

**FACULDADE DE ECONOMIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO**



# **Previsão de Indicadores de Qualidade de Ar Exterior em Ambiente Urbano**

**por**

**Sara Maria Maia da Rocha**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Economia e Gestão do Ambiente pela  
Faculdade de Economia do Porto

Orientada por: Professor Doutor Cláudio Monteiro

Setembro de 2014

## **Breve Nota Biográfica**

Sara Maria Maia da Rocha é natural de São Pedro, Torres Novas, distrito de Santarém. Nasceu a 3 de Agosto de 1990 e frequentou o ensino básico na Escola Visconde de São Gião, Torres Novas.

A sua formação académica inicia-se na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, com a licenciatura em Ciências e Tecnologia do Ambiente entre 2008/2011. Em Março de 2011, iniciou um estágio curricular na empresa CIIMAR, dedicada à avaliação de impacte ambiental e biodiversidade.

Seguiu os seus estudos, com o mestrado em Economia e Gestão do Ambiente na Faculdade de Economia da Universidade do Porto, em Setembro de 2012. Em Janeiro de 2014, realizou um estágio curricular na empresa Smartwatt, destinada à previsão de emissões. O presente trabalho de dissertação pretende concluir o nível académico anteriormente referido.

## **Agradecimentos**

Quero deixar aqui um especial agradecimento ao meu orientador, Professor Cláudio Monteiro, por todo o apoio, orientação e dedicação que prestou ao longo destes meses que se revelaram cruciais para a conclusão desta investigação. Assim como aos colaboradores da empresa Smartwatt pela disponibilidade e colaboração no desenvolvimento desta dissertação.

O meu maior agradecimento deixo-o à minha família que me proporcionou a oportunidade de ingressar no ensino superior e concluir os meus estudos, contribuindo para a minha educação, realização pessoal e profissional. À minha Avó, Tia e Irmãos o meu sincero obrigada.

Agradeço também às amigas sempre presentes Catarina, Inês e Rita. Não podendo deixar de agradecer em particular ao Ivo por todo o importante apoio e paciência demonstrada.

Finalmente, o meu agradecimento para todos os meus colegas de faculdade e da Cientuna, que sempre me acompanharam ao longo do meu percurso académico.

## Resumo

Atualmente, a poluição atmosférica é um problema com impactes consideráveis na população das regiões urbanas, com influência na saúde humana e ambiente. Em grandes meios urbanos tornou-se uma prioridade a previsão da evolução temporal da poluição atmosférica, de modo a garantir uma boa qualidade de vida.

Com a finalidade de identificar e prever períodos de baixa qualidade do ar, têm vindo a ser desenvolvidos modelos de previsão da qualidade do ar, tendo em consideração as características da poluição atmosférica e os seus impactes.

A aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNAs) a problemas das áreas da engenharia ambiental tem vindo a aumentar, demonstrando vários graus de sucesso. Nesta investigação foram aplicadas RNAs de modo a criar modelos com a capacidade de prever o comportamento de vários poluentes ambientais (CO, NO, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> e O<sub>3</sub>), na cidade do Porto.

Os modelos construídos resultam do cruzamento de variáveis meteorológicas (direção e velocidade do vento, temperatura, radiação, índice de nuvens e pluviosidade) e do histórico de emissões registadas em duas estações de monitorização situadas na cidade do Porto para os poluentes já referidos.

Esta investigação prova que é possível prever, a concentração de alguns poluentes utilizando previsões meteorológicas. Foram identificadas as variáveis que melhor explicam as concentrações dos poluentes. E foram também avaliados os desempenhos dos vários modelos de previsão.

Perante esta investigação pode-se concluir que a qualidade do ar na cidade do Porto é bastante influenciada pelo tráfego rodoviário e que tem variações de carácter sazonal.

**Palavras-chave:** Qualidade do ar, modelos de previsão, poluentes atmosféricos, redes neurais artificiais.



## Abstract

Currently, air pollution is a problem with considerable impact on the population in urban areas, with influence on human health and in the environment. In large urban areas, it became a priority to forecast the temporal evolution of atmospheric pollution, to ensure a good quality of life.

In order to identify and predict periods of low air quality, forecast models have been developed and taking into account the characteristics of air pollution and their impacts.

The application of Artificial Neural Networks (ANN) to problems in the areas of environmental engineering has increased, showing various degrees of success. AAN were applied in this research to create models with the ability to predict the behavior of various environmental pollutants (CO, NO, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> e O<sub>3</sub>) in the city of Porto.

The constructed models resulted from the crossing of meteorological variables (wind speed and direction, temperature, radiation, clouds and rainfall index) and the historic emissions in two monitoring stations located in the city of Porto of the aforementioned pollutants.

This research proves that it's possible to predict the concentration of some pollutants, using weather forecasts. The variables that best explain the concentrations of the studied pollutants were identified, nd were also evaluated the performances of various forecasting models.

Given this research it can be concluded that the air quality in the city of Porto is strongly influenced by road traffic and has seasonal variations.

**Keywords:** Air quality, forecasting models, atmospheric pollutants, artificial neural networks.

*"The consequences of our actions are so complicated,  
so diverse, that predicting the future is a very difficult  
business indeed."*

**J.K.Rowling**

# Índice

Breve Nota Biográfica.....	i
Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iii
Abstract .....	iv
Índice.....	v
Índice de Tabelas.....	viii
Índice de Figuras .....	ix
Abreviaturas e Símbolos .....	xiii
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.3 Metodologias e Técnicas.....	4
1.4 Estrutura da dissertação.....	4
1.5 Dados utilizados na dissertação .....	5
1.6 Smartwatt .....	5
<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>6</b>
<b>Estado da Arte.....</b>	<b>6</b>
2.1 Qualidade do Ar Urbano .....	6
2.2 Poluentes atmosféricos.....	8
2.3 Enquadramento Legal .....	14
2.4 Monitorização da Qualidade do Ar em Portugal.....	17
<b>Capítulo 3 .....</b>	<b>26</b>
<b>Previsão e Modelação da Qualidade do Ar em Portugal .....</b>	<b>26</b>
3.1 Estado da Arte em Previsão da Qualidade do Ar.....	26
3.2. Divulgação da previsão e gestão da qualidade do ar.....	32
3.3 Estado da Arte em Modelação da Qualidade do Ar .....	34
<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>50</b>
<b>Caracterização do Caso de Estudo.....</b>	<b>50</b>
4.1. Enquadramento Geográfico .....	50
4.2. Caracterização socioeconómica .....	51
4.3 Monitorização da Qualidade do Ar .....	53
4.4. Caso de Estudo .....	55

<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>57</b>
<b>Análise dos Dados .....</b>	<b>57</b>
5.1 Introdução .....	57
5.2 Análise dos dados do CO .....	58
5.3 Análise dos dados do NO .....	60
5.4 Análise dos dados do NO <sub>2</sub> .....	62
5.5 Análise dos dados do NO <sub>x</sub> .....	66
5.6 Análise dos dados das PM <sub>10</sub> .....	69
5.7 Análise dos dados das PM <sub>2,5</sub> .....	72
5.8 Análise dos dados do O <sub>3</sub> .....	74
<b>Capítulo 6 .....</b>	<b>76</b>
<b>Modelos de Previsão .....</b>	<b>76</b>
6.1 Introdução .....	76
6.2 Processo da Metodologia .....	76
6.3 Avaliação dos Modelos .....	77
6.4 Descrição do Modelo .....	79
6.5 Configuração da Rede Neuronal .....	81
6.6 Resultados .....	82
6.7 Comparação dos Resultados dos Modelos .....	98
<b>Capítulo 7 .....</b>	<b>101</b>
<b>Considerações Finais .....</b>	<b>101</b>
7.1 Trabalhos Futuros.....	103
<b>Capítulo 8 .....</b>	<b>104</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>104</b>
<b>Capítulo 9 .....</b>	<b>I</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>I</b>
Anexo I - Limites legais impostos pela Diretiva 2008/50/CE .....	II
Anexo II – Resultados da Previsão do CO.....	V
Anexo III – Resultados da Previsão do NO .....	VI
Anexo IV – Resultados da Previsão do NO <sub>2</sub> .....	VIII
Anexo V – Resultados da Previsão do NO <sub>x</sub> .....	X
Anexo VI – Resultados da Previsão das PM <sub>10</sub> .....	XII
Anexo VII – Resultados da Previsão das PM <sub>2,5</sub> .....	XIV
Anexo VIII – Resultados da Previsão do O <sub>3</sub> .....	XV

## Índice de Tabelas

Tabela 1- Poluentes atmosféricos tradicionais e perigosos. ....	7
Tabela 2 - Diretiva 2008/50/CE de 21 de Maio.....	15
Tabela 3- Tipos de estação quanto ao ambiente e influência. ....	20
Tabela 4 - Tetos máximos de emissões de 2010, para os poluentes SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , COVNM e NH <sub>3</sub> , como estabelecido no Anexo I da NEDC. ....	23
Tabela 5- Comparação de métodos de previsão (elaboração própria, adaptado de (USEPA, 1999))......	30
Tabela 6 - Classificação do Índice de Qualidade do Ar proposto para o ano de 2014 ..	33
Tabela 7- Classes do índice de qualidade do ar do sistema determinístico.....	40
Tabela 8 - Variáveis de saída do modelo MM5 necessárias para o modelo químico CHIMERE. ....	46
Tabela 9 - Características das estações de medida de qualidade do ar da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte, da aglomeração Porto Litoral. ...	54
Tabela 10 - Caracterização das estações monitorização de qualidade do ar da RMQA, do concelho do Porto. ....	55
Tabela 11 - Eficiências por analisador, nas estações da RMQA-RN, em 2011. ....	56
Tabela 12 - Passo 1 - Aquisição das 5 previsões individuais para obtenção do modelo ensemble.....	78
Tabela 13 - Passo 2 – Cálculo do erro de cada modelo individual para obtenção do erro <i>ensemble</i> . ....	78
Tabela 14 - Erros MAPE para a previsão de CO.....	83
Tabela 15 - Erros MAPE para a previsão de NO, na estação de FSC e S-LO. ....	85
Tabela 16 - Erros MAPE para a previsão de NO <sub>2</sub> , na estação de FSC e S-LO. ....	88
Tabela 17 - Erros MAPE para a previsão de NO <sub>x</sub> , na estação de FSC e S-LO. ....	91
Tabela 18 - Erros MAPE para a previsão de PM <sub>10</sub> , na estação de FSC e S-LO. ....	94
Tabela 19 - Erros MAPE para a previsão de PM <sub>2,5</sub> , na estação de S-LO. ....	95
Tabela 20 - Erros MAPE para a previsão do O <sub>3</sub> , na estação de S-LO.....	97

## Índice de Figuras

Figura 1- Percentagem da população urbana da UE exposta a concentrações de poluentes atmosféricos acima dos níveis de referência da UE (EEA, 2013b). ....	2
Figura 2- Pirâmide dos efeitos da poluição do ar na saúde humana (Miranda, 2014). ....	9
Figura 3- Transposição da Legislação Comunitária para Legislação Nacional relativa à qualidade do ar.....	17
Figura 4 - Evolução da EU-27 de modo a cumprir os tetos máximos de emissão, estabelecidos nos Anexos I e II da diretiva NECD: dados sobre as emissões agregadas dos Estados Membros finais de 2010 e 2011, e provisórios de 2012, em comparação com os limites máximos (EEA, 2014).....	24
Figura 5 – Gráfico do comportamento evolutivo das emissões em Portugal (elaboração própria). ....	25
Figura 6 - Esquema do sistema de modelos MM5-CHIMERE (adaptado de (A.; Monteiro et al., 2007) (M. Monteiro, 2007)).....	39
Figura 7 - Índices de qualidade do ar previstos a 31 de Março, para os dias 1 e 2 de Abril (GEMAC, 2014).....	40
Figura 8 - Configuração vertical (a) e horizontal (b) do modelo meteorológico MM5 (Ana Monteiro, 2009).....	41
Figura 9 - Módulos do sistema de modelação MM5 (adaptado de (I. L. Ribeiro, 2008)). ....	42
Figura 10 - Domínio de simulação do modelo MM5 para aplicação no sistema de previsão da qualidade do ar, em Portugal Continental (I. L. Ribeiro, 2008).....	44
Figura 11 - Domínios geográficos utilizados pelo modelo CHIMERE (A.; Monteiro et al., 2007).....	45
Figura 13 - Exemplo de rede neuronal (elaboração própria).....	48
Figura 12 - Estrutura de uma unidade de uma rede neuronal (Lopes, 2010). ....	48
Figura 14 - Mapa da região Norte (CCDRN, 2014).....	50
Figura 15 - Classificação climática de Köppen-Geiger na Península Ibérica e Ilhas Baleares (IM & AEmet, 2011). ....	51
Figura 16 - Distribuição da população residente no distrito do Porto, em 2001 (INE, 2014).....	52
Figura 17 - Distribuição da população residente no distrito do Porto, em 2011 (INE, 2014).....	52

Figura 18 - Rede de medida da qualidade do ar da Região Norte (CCDRN, 2012).....	53
Figura 19 - Localização das estações de monitorização consideradas neste estudo, Francisco Sá Carneiro – Campanhã (41°09'52" -8°35'22") e Sobreiras - Lordelo do Ouro (41°08'51" -8°39'32"). .....	55
Figura 20 - Evolução da concentração de CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Francisco Sá Carneiro. ....	58
Figura 21 - Histograma da distribuição de frequências dos dados amostrais das concentrações de CO, registados na estação de Francisco Sá Carneiro, entre Abril de 2012 e Abril de 2014. ....	59
Figura 22 - Representação das concentrações horárias do CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), e médias das concentrações de CO por hora do dia, na estação de monitorização de Francisco Sá Carneiro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014).....	59
Figura 23 - Evolução da concentração do NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Francisco Sá Carneiro. ....	60
Figura 24 - Evolução da concentração do NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Sobreiras-Lordelo do Ouro.....	60
Figura 25 - Histograma da distribuição de frequências dos dados amostrais das concentrações de NO, registados na estação de Francisco Sá Carneiro (a) e Sobreiras Lordelo do Ouro (b), entre Abril de 2012 e Abril de 2014. ....	61
Figura 26 - Representação das concentrações horárias do NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), e médias das concentrações de NO por hora do dia, na estação de monitorização de Francisco Sá Carneiro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014).....	62
Figura 27 - Representação das concentrações horárias do NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), e médias das concentrações de NO por hora do dia, na estação de monitorização de Sobreiras – Lordelo do Ouro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014).....	62
Figura 28 - Evolução da concentração de NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Francisco Sá Carneiro. ....	63
Figura 29 - Evolução da concentração de NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Sobreiras – Lordelo do Ouro. ....	63
Figura 30 - Histograma da distribuição de frequências dos dados amostrais das concentrações de NO <sub>2</sub> , registados na estação de Francisco Sá Carneiro (a) e Sobreiras Lordelo do Ouro (b), entre Abril de 2012 e Abril de 2014. ....	64
Figura 31 - Representação das concentrações horárias do NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), e médias das concentrações de NO <sub>2</sub> por hora do dia, na estação de monitorização de Francisco Sá Carneiro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014).....	64
Figura 33 - Evolução das concentrações médias dos máximos horários estabelecidos para o NO <sub>2</sub> , registados entre 1 de Abril de 2012 e 31 de Abril de 2014, em relação ao	

limiar legal superior (LSA) e inferior (LIA) de avaliação, nas estações de monitorização FSC e S-LO. ....	65
Figura 32 - Representação das concentrações horárias do NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> ), e médias das concentrações de NO <sub>2</sub> por hora do dia, na estação de monitorização de Sobreiras – Lordelo do Ouro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014). ....	65
Figura 34 - Evolução da concentração de NO <sub>x</sub> (µg/m <sup>3</sup> ), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Francisco Sá Carneiro. ....	66
Figura 35 - Evolução da concentração de NO <sub>x</sub> (µg/m <sup>3</sup> ), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Sobreiras – Lordelo do Ouro. ....	67
Figura 36 - Histograma da distribuição de frequências dos dados amostrais das concentrações de NO <sub>x</sub> , registados na estação de Francisco Sá Carneiro (a) e Sobreiras Lordelo do Ouro (b), entre Abril de 2012 e Abril de 2014. ....	67
Figura 37 - Representação das concentrações horárias do NO <sub>x</sub> (µg/m <sup>3</sup> ), e médias das concentrações de NO <sub>x</sub> por hora do dia, na estação de monitorização de Francisco Sá Carneiro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014). ....	68
Figura 38 - Representação das concentrações horárias do NO <sub>x</sub> (µg/m <sup>3</sup> ), e médias das concentrações de NO <sub>x</sub> por hora do dia, na estação de monitorização de Sobreiras – Lordelo do Ouro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014). ....	68
Figura 39 - Evolução da concentração de PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> ), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Francisco Sá Carneiro. ....	69
Figura 40 - Evolução da concentração de PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> ), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Sobreiras – Lordelo do Ouro. ....	69
Figura 41 - Histograma da distribuição de frequências dos dados amostrais das concentrações de PM <sub>10</sub> , registados na estação de Francisco Sá Carneiro (a) e Sobreiras Lordelo do Ouro (b), entre Abril de 2012 e Abril de 2014. ....	70
Figura 42 - Representação das concentrações horárias do PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> ), e médias das concentrações de PM <sub>10</sub> por hora do dia, na estação de monitorização de Francisco Sá Carneiro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014). ....	71
Figura 43 - Representação das concentrações horárias do PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> ), e médias das concentrações de PM <sub>10</sub> por hora do dia, na estação de monitorização de Sobreiras – Lordelo do Ouro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014). ....	71
Figura 44 - Evolução das concentrações médias dos máximos diários estabelecidos para as PM <sub>10</sub> , registados entre 1 de Abril de 2012 e 31 de Abril de 2014, em relação ao valor limite legal, nas estações de monitorização FSC e S-LO. ....	72
Figura 45 - Evolução da concentração de PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Sobreiras – Lordelo do Ouro. ....	73



Figura 46 - Histograma da distribuição de frequências dos dados amostrais das concentrações de PM <sub>2,5</sub> , registados na estação Sobreiras Lordelo do Ouro, entre Abril de 2012 e Abril de 2014. ....	73
Figura 47 - Representação das concentrações horárias do PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ), e médias das concentrações de PM <sub>2,5</sub> por hora do dia, na estação de monitorização de Sobreiras – Lordelo do Ouro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014). ....	74
Figura 48 - Evolução da concentração de O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> ), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Sobreiras – Lordelo do Ouro. ....	74
Figura 49 - Histograma da distribuição de frequências dos dados amostrais das concentrações do O <sub>3</sub> , registados na estação Sobreiras Lordelo do Ouro, entre Abril de 2012 e Abril de 2014. ....	75
Figura 50 - Representação das concentrações horárias do O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> ), e médias das concentrações de O <sub>3</sub> por hora do dia, na estação de monitorização de Sobreiras – Lordelo do Ouro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014). ....	75
Figura 51 - Quadro temporal do modelo previsão. ....	80
Figura 52 - Gráfico da previsão das concentrações do CO na semana 23 de 2012. ....	83
Figura 53 - Gráfico da previsão das concentrações do NO, para a estação de FSC na semana 33 de 2012. ....	84
Figura 54 - Gráfico da previsão das concentrações do NO, para a estação de S-LO na semana 33 de 2012. ....	85
Figura 55 - Gráfico da previsão das concentrações do NO <sub>2</sub> , para a estação de FSC na semana 43 de 2012. ....	87
Figura 56 - Gráfico da previsão das concentrações do NO <sub>2</sub> , para a estação de S-LO na semana 43 de 2012. ....	88
Figura 57 - Gráfico da previsão das concentrações do NO <sub>x</sub> , para a estação de FSC na semana 33 de 2012. ....	90
Figura 58 - Gráfico da previsão das concentrações do NO <sub>x</sub> , para a estação de S-LO na semana 33 de 2012. ....	90
Figura 59 - Gráfico da previsão das concentrações das PM <sub>10</sub> , para a estação de FSC na semana 25 de 2013. ....	93
Figura 60 - Gráfico da previsão das concentrações das PM <sub>10</sub> , para a estação de S-LO na semana 33 de 2012. ....	93
Figura 61 - Gráfico da previsão das concentrações das PM <sub>2,5</sub> , para a estação de S-LO na semana 23 de 2012. ....	95
Figura 62 - Gráfico da previsão das concentrações do O <sub>3</sub> , para a estação de S-LO na semana 33 de 2012. ....	97

## Abreviaturas e Símbolos

AAE	Agência Europeia do Ambiente (AEA, <i>European Environment Agency</i> )
APA	Agência Portuguesa de Ambiente
CAFE	<i>Clean Air for Europe</i>
CART	<i>Classification and Regression Tree</i>
CCDR	Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional
CCDR-N	Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte
CE	Comissão Europeia
CHIMERE	<i>Nested Eulerian chemical transport model</i>
CTM	<i>Chemical transport models</i>
DCEA-FCT/UNL	Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
DF	Diretiva Filha
DL	Decreto Lei
EMA	Estações meteorológicas automáticas
EMEP	<i>The European and Evolution Programme</i>
EMQA	Estações de monitorização da qualidade do ar
FSC	Francisco Sá Carneiro
GEE	Gases de efeito de estufa
GEMAC-DAO	Departamento de Ambiente e Ordenamento do Território
GLCF	<i>Global Land Cover Facility</i>
HERMES	<i>High-Elective Resolution Modelling Emission System</i>
INERPA	Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
IQUAr	Índice de qualidade do ar
LIA	Limiar inferior de avaliação
LSA	Limiar superior de avaliação
MAPE	<i>Mean absolute percentage error</i>
MM5	<i>Fifth Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model</i>
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NECD	<i>Nacional Emission Ceilings Directive</i>
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
OMS	Organização Mundial de Saúde
PNAC	Plano Nacional para as Alterações Climáticas

PTEN	Programa para os Tetos de Emissão Nacional
QualAr	Base de Dados Online sobre Qualidade do Ar
RM	<i>Resgression Model</i>
RMQAr	Redes de monitorização da qualidade do ar
RNAs	Redes neuronais artificiais
RT-AQF	<i>Real time air quality forecasting</i>
S-LO	Sobreiras–Lordelo do Ouro
UA	Universidade de Aveiro
UE	União Europeia
VA	Valor Alvo
VL	Valor limite
WHO	<i>World Health Organization</i>
WRF	<i>Weather Research and Forecasting Model</i>

### **Símbolos de elementos e compostos químicos:**

As	Arsénio
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benzeno
Cd	Cádmio
CH <sub>4</sub>	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
COV's	Compostos orgânicos voláteis
COVNM	Compostos orgânicos voláteis não metânicos
Hg	Mercúrio
NH <sub>3</sub>	Amoníaco
NO	Monóxido de azoto
NO <sub>2</sub>	Dióxido de azoto
No <sub>x</sub>	Óxidos de azoto
O <sub>3</sub>	Ozono
PAHs	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos
Pb	Chumbo
PM <sub>10</sub>	Partículas (diâmetro até 10µm)
PM <sub>2,5</sub>	Partículas (diâmetro até 2,5µm)
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre

PM                      *Particulate matter*, MP Matéria particulada

**Símbolos:**

$a_k / b_k$	Coeficientes híbridos
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
Gg	Gigagrama
Km / Km <sup>2</sup>	Quilómetro / quilómetro quadrado
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
m/s	Metros por segundo
mm/m <sup>2</sup>	Milímetro por metro quadrado
$p_i$	Pressão de nível em $i$
$p_t$	Pressão de topo
$p_s$	Pressão à superfície
w/m <sup>2</sup>	Watt por metro quadrado
$\mu\text{m}$	Micrómetro

# Capítulo 1

## Introdução

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito do Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente, na Faculdade de Economia da Universidade do Porto.

Neste trabalho são desenvolvidos modelos de previsão horária para diversos indicadores de qualidade de ar exterior em ambiente urbano. Por indicadores de qualidade do ar, entenda-se concentrações horárias previstas de vários poluentes, por estação de monitorização, que permitem inferir sobre a qualidade do ar exterior. Visão a aplicação dos modelos à cidade do Porto.

Como resultado, surge neste trabalho, uma descrição do processo de investigação inerente à criação dos modelos de previsão de qualidade do ar. Estes foram sujeitos a avaliação, de forma a demonstrar a sua robustez e eficácia.

O propósito deste capítulo é expôr o contexto em que surge a importância da criação de modelos de previsão de qualidade do ar exterior, sendo que neste capítulo é apresentada de forma sucinta a descrição da organização da dissertação.

### 1.1 Enquadramento

A temática da qualidade do ar emergiu nas últimas décadas junto da comunidade científica, com tal intensidade que é encarada tanto como desafio, como por problema a solucionar na sociedade contemporânea. Atualmente, acredita-se ser um assunto de vital importância na conjectura da qualidade de vida nos grandes centros urbanos.

A crescente taxa de industrialização e urbanização tem resultado em excessivos níveis de poluição atmosférica a nível mundial. Deste modo, o contexto da qualidade do ar tornou-se uma prioridade em muitos países industrializados, devido ao aumento da perceção dos efeitos da fraca qualidade do ar na saúde e no ambiente.

No relatório mais recente da Agência Europeia do Ambiente (EEA, do inglês *European Environment Agency*), sobre a qualidade do ar na Europa, que relata o nível de

exposição da população à poluição atmosférica, conclui-se que quase um terço da população europeia está exposta a níveis fracos de qualidade do ar. A figura 1 apresenta a percentagem da população urbana da União Europeia (UE) exposta a níveis de poluentes superiores ao permitido pelos níveis estabelecidos pela UE. Relatando que a exposição da população ao ozono ( $O_3$ ), partículas e dióxido de azoto ( $NO_2$ ) é considerável (EEA, 2013c).

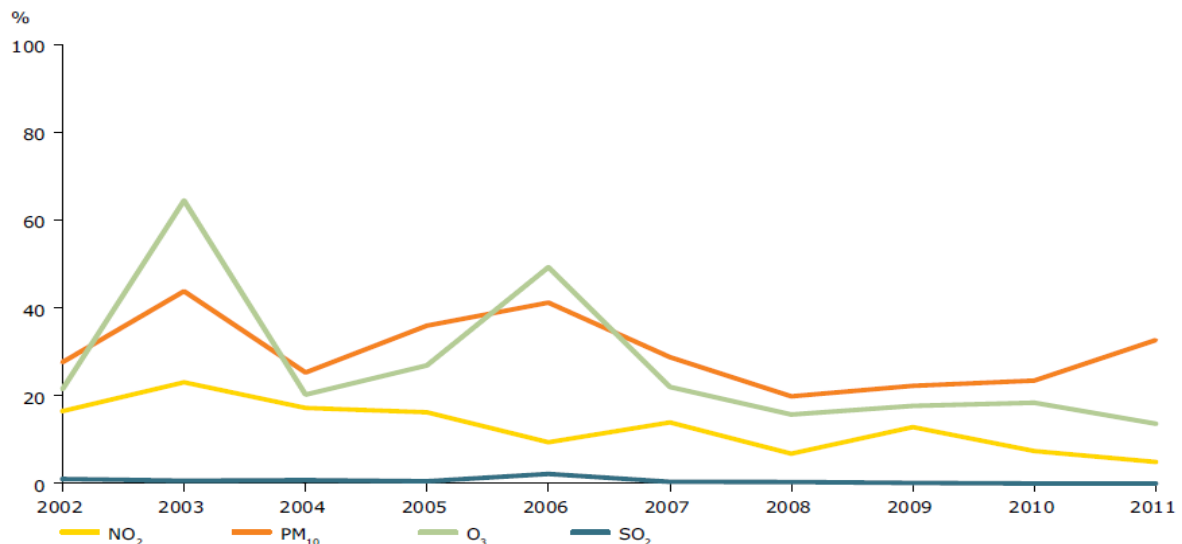


Figura 1- Percentagem da população urbana da UE exposta a concentrações de poluentes atmosféricos acima dos níveis de referência da UE (EEA, 2013b).

O mesmo relatório confirma que apesar do decréscimo a nível das emissões atmosféricas que se tem verificado nas últimas décadas, o problema da poluição atmosférica não está de todo perto de ser solucionado. Poluentes como as partículas inaláveis ( $PM_{2,5}$  e  $PM_{10}$ ), e o ozono ( $O_3$ ) são uma importante causa de problemas de saúde humana (EEA, 2013c), sendo que a poluição do ar exterior passou a pertencer à lista de agentes cancerígenos da Organização Mundial de Saúde (OMS) (IARC, 2013).

Como resposta a estas questões de sustentabilidade ambiental, nos últimos anos a maioria dos países desenvolvidos tem vindo a estabelecer leis e a desenvolver programas de monitorização de concentrações de poluentes, de modo a combater a problemática da poluição atmosférica.

A Comissão Europeia desenvolveu um plano estratégico, através do estabelecimento de objetivos de longo prazo de qualidade do ar. Sendo criado um conjunto de diretivas de modo a controlar os níveis de determinados compostos químicos na atmosfera. Em 1996, surgiu a Diretiva Quadro da Qualidade do Ar, relativa à avaliação e gestão da

qualidade do ar exterior. Esta diretiva revê legislação anterior e introduz novas normas de regulação de qualidade do ar, atribuindo prazos para o desenvolvimento de diretivas filhas para um determinado conjunto de poluentes. Estas diretivas filhas foram transpostas para a legislação nacional.

Algumas das estratégias de gestão e controlo da qualidade do ar resultaram na criação de índices, que permitem classificar a qualidade do ar segundo as concentrações de vários poluentes e relatam a sua qualidade de acordo com expressões como “bom”, “moderado” ou “insalubre”.

A previsão da qualidade do ar surge como uma ferramenta de auxílio na elaboração de planos de redução de emissões, assim como um mecanismo de informação e alerta ao público quando ocorrem situações que de alguma forma prejudiquem a saúde humana. Atualmente, já existem vários sistemas de previsão da qualidade do ar na Europa e alguns deles são focados na previsão a nível nacional.

## **1.2 Objetivos**

No âmbito geral, a presente dissertação apresenta como objetivo principal a criação de modelos de inteligência computacional para previsão horária de diversos indicadores de qualidade de ar exterior, a curto prazo com aplicação à cidade do Porto.

A presente investigação pretende ser uma mais-valia na área da investigação, uma vez que até ao momento poucos autores abordaram o assunto neste contexto.

A criação dos modelos de previsão partiu dos seguintes requisitos:

- Estudo do estado da arte sobre indicadores de qualidade do ar exterior;
- Estudo do estado da arte sobre técnicas de previsão;
- Recolha e análise de dados históricos de indicadores de qualidade de ar e de variáveis meteorológicas;
- Construção e treino de modelos matemáticos de previsão;
- Operacionalização do sistema de previsão;
- Teste de resultados.

### **1.3 Metodologias e Técnicas**

No desenvolvimento do presente estudo foram escolhidas ferramentas que incorporaram inteligência computacional, assim como técnicas estatísticas de previsão. Com o propósito de previsão da emissão e comportamento dos poluentes a curto prazo, foram aplicadas ferramentas de inteligência artificial, através da aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNAs).

Através da utilização de RNAs e utilizando o *software* MatLab, a estratégia de previsão das concentrações dos poluentes em estudo consiste na aprendizagem dos comportamentos dos registos dos poluentes e do conjunto de variáveis identificados como tendo influência neste processo.

### **1.4 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação é constituída por seis capítulos, sendo o presente capítulo de carácter introdutório, no qual é apresentado o enquadramento do tema, os objetivos da investigação, as metodologias e técnicas utilizadas e ainda informação sobre os dados que foram utilizados no desenvolvimento da investigação.

O 2º capítulo é dedicado ao estado da arte relativo à qualidade do ar em ambiente urbano, ao enquadramento legal europeu e nacional relacionado com a temática da qualidade do ar e ainda é apresentado o estado da monitorização da qualidade do ar em Portugal.

O 3º capítulo é dedicado exclusivamente à previsão e modelação da qualidade do ar em Portugal. Neste capítulo são apresentados os modelos que estão em operação atualmente. Pretende-se demonstrar o funcionamento dos vários tipos de abordagens destes modelos de previsão, assim como algumas das suas aplicações. Nesta secção são apresentadas diferentes metodologias, tendo sido dada especial importância aos modelos mais usualmente utilizados no contexto europeu, como os modelos estatísticos, visto que os modelos baseados em inteligência artificial foram aplicados nesta investigação.

No 4º capítulo é realizada uma análise dos dados relacionados com os poluentes monitorizados no concelho da cidade do Porto. Este estudo foi realizado recorrendo a gráficos temporais, histogramas de densidade de frequências e gráficos de concentrações médias, para o período em estudo. A partir desta análise foi possível retirar algumas conclusões que foram confirmadas no capítulo seguinte.



O 5º capítulo é dedicado exclusivamente à análise dos vários modelos de previsão construídos, sendo apresentadas as diferentes metodologias utilizadas e observar os resultados obtidos pela sua aplicação.

No 6º e último capítulo, são apresentadas as conclusões finais de toda a investigação realizada nesta dissertação e ainda algumas sugestões de trabalhos futuros.

## **1.5 Dados utilizados na dissertação**

Para a realização desta investigação foram criados vários modelos, utilizando vários tipos de dados. Os dados meteorológicos aplicados nesta dissertação são dados horários das variáveis temperatura, velocidade e direção do vento, radiação solar, pluviosidade e índice de nuvens. Estes foram fornecidos pelos colaboradores da empresa Smartwatt.

Os dados relativos às emissões dos poluentes atmosféricos são dados provenientes das estações de monitorização de qualidade do ar da cidade do Porto (Francisco Sá Carneiro e Sobreiras). Estes dados foram pedidos e gentilmente cedidos pela Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte (CCDR-N).

## **1.6 Smartwatt**

A Smartwatt - Energy Services, S.A., é uma empresa prestadora “de serviços de energia que fornece soluções para sistemas de energia. A empresa atua em três vetores distintos (energias renováveis, eficiência energética e Sistemas de Inteligência), com o objetivo de otimizar o uso dos recursos energéticos existentes” (Smartwatt, 2014).

Fundada em 2008, a empresa apresenta como objetivo fornecer aos seus clientes métodos para redução de custos, soluções de produção de energia limpa e soluções inteligentes de monitorização e otimização de sistemas de energia (Smartwatt, 2014).

# Capítulo 2

## Estado da Arte

### 2.1 Qualidade do Ar Urbano

O ar como mistura predominantemente mecânica de diversos gases individuais que no seu conjunto formam a atmosfera terrestre (EEA, 2013d), é caracterizado como bem não escasso, não se encontra sujeito a gestão de quantidade, mas sim a gestão de qualidade (Rodrigues, 2013). Numa abordagem inicial, qualidade do ar diz respeito ao estado químico da atmosfera num determinado local e tempo (Zhang *et al.*, 2012), e é possível ser avaliada de acordo com os níveis de poluição atmosférica.

A poluição atmosférica pode ser definida como a presença de substâncias poluentes ou contaminantes no ar, em concentrações que interferem com a saúde e bem-estar humano, ou que produzem efeitos ambientais prejudiciais (EEA, 2013d).

A atmosfera como massa gasosa que envolve a Terra, é classificada em camadas consoante as diferentes densidades dos gases que a constituem e sofre movimentos constantes (AEA, 2013). São considerados poluentes ambientais os compostos químicos presentes na atmosfera em concentrações anormalmente elevadas, e consequentemente, poderão causar danos no meio ambiente.

Segundo a OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico), os contaminantes atmosféricos podem ser agrupados em dois grupos, de acordo com a sua natureza química. Os poluentes atmosféricos tradicionais e os poluentes perigosos, que são classificados em cinco categorias, como se encontram identificados na Tabela 1 (EEA, 1998).

Tabela 1- Poluentes atmosféricos tradicionais e perigosos.

<b>Poluentes atmosféricos tradicionais</b>	Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> ); óxidos de azoto (NO <sub>x</sub> ); monóxido de carbono (CO); chumbo (Pb); material particulado (PM); ozono (O <sub>3</sub> ) e compostos orgânicos voláteis (COV's);
<b>Poluentes perigosos</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Metais e metalóides, cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e arsénio (As);</li> <li>2. Fibras minerais, por exemplo, microfibras respiráveis de amianto e vidro;</li> <li>3. Gases inorgânicos, por exemplo, fluoretos, cloro, e cianetos;</li> <li>4. Compostos não orgânicos halogenados;</li> <li>5. Compostos orgânicos halogenados.</li> </ol>

Fonte: Adaptado de (EEA, 1998).

Dependendo dos processos responsáveis pela emissão de substâncias poluentes no ar, a poluição atmosférica pode ser causada por fontes fixas ou móveis. As fontes fixas estão normalmente associadas a indústrias como fontes mais significativas, como por exemplo a indústria termoelétrica ou de incineração de resíduos. Com elevado potencial poluidor e inseridas nas fontes de carácter fixo, encontram-se as fontes fixas naturais resultantes de fenómenos de vulcanismo. As fontes móveis de poluição correspondem aos veículos de transporte, que pela sua elevada mobilidade têm um elevado raio de propagação.

Relacionado com a sua origem, os poluentes são caracterizados como primários, se resultam da emissão direta na fonte, ou como secundários se a sua formação é causada por reações físico-químicas entre poluentes primários e constituintes da atmosfera (IAP, 2013). Como principais fontes de poluição destaca-se o setor da indústria, energia e transportes, que são diretamente responsáveis pela degradação da qualidade do ar, principalmente nas zonas urbanas.

A degradação da qualidade do ar nos grandes centros urbanos, é atualmente, foco de estudo e de preocupação, uma vez que nestas zonas são verificadas grandes concentrações de poluentes e é precisamente nas zonas urbanas que habita grande parte da população mundial.

No noroeste da Europa, mais de 80% da população vive em cidades. Contudo, mais de 70% das maiores cidades europeias não cumprem as diretrizes de qualidade do ar,

recomendadas pela Organização Mundial de Saúde (OMS) (Mensink, 2008). Em muitas cidades europeias, as emissões provenientes de tráfego automóvel tornaram-se a principal fonte de poluição atmosférica local, considerada como a pressão ambiental urbana mais significativa (Vlachokostas *et al.*, 2011). Das fontes de poluição atmosférica, o setor dos transportes destaca-se devido à relação de proximidade entre as fontes emissoras e a população, com níveis elevados de exposição aos poluentes e fracas condições de dispersão dos mesmos (Rodrigues, 2013).

As cidades enquanto centros de desenvolvimento urbano integrado (social, económico e cultural), caracterizam-se por uma elevada diversidade de atividades inerentes ao seu desenvolvimento, que causam impactes significativos na qualidade do ar urbano. Os centros urbanos apresentam uma elevada densidade populacional e provocam vários problemas ambientais, relacionados com processos de poluição, consumo energético e gestão de resíduos, que se refletem na qualidade do ar urbano (Costa, 2003).

## **2.2 Poluentes atmosféricos**

Considera-se poluente qualquer substância presente na atmosfera em elevadas concentrações, que torne o ar impróprio para a saúde humana, causando a degradação do bem-estar público, da fauna e da flora. A origem de poluentes atmosféricos pode ser decorrente de atividades antropogénicas ou de fenómenos naturais (atividade vulcânica, incêndios florestais e tempestades de areia) (AEA, 2013).

Na Europa a poluição atmosférica continua a afetar a qualidade de vida (Figura 2), a reduzir a esperança média de vida e a prejudicar o meio ambiente, apesar das melhorias significativas registadas nas últimas décadas. Destacando-se a poluição originada pelas partículas e ozono (EEA, 2013e). Contudo, vários poluentes têm impactes e fontes diferentes, sendo importante estudar o seu papel na deterioração da qualidade do ar (AEA, 2013).



Figura 2- Pirâmide dos efeitos da poluição do ar na saúde humana (Miranda, 2014).

#### a) **Matéria Particulada**

A matéria particulada (*Particulate Matter*, PM) é o termo geral utilizado para uma mistura complexa de partículas sólidas e líquidas, orgânicas e inorgânicas suspensas no ar (EEA, 2013c) (WHO, 2003). As partículas são produzidas por processos antropogênicos e naturais e variam muito em tamanho, composição e origem (EEA, 2013c). As fontes naturais incluem sal marinho, poeiras, pólen e cinzas vulcânicas, enquanto as fontes antropogênicas incluem a queima de combustíveis fósseis na geração de energia térmica, incineração e aquecimento doméstico para as famílias (EEA, 2013c).

No que diz respeito à massa e composição, em ambientes urbanos, as partículas podem ser divididas em dois grupos. As  $PM_{10}$  são partículas com diâmetro até  $10\mu m$ , ou seja, são partículas grosseiras e finas. As  $PM_{2,5}$  estão definidas até  $2,5\mu m$  e compreendem as partículas finas e ultrafinas (WHO, 2003). Ambos os tipos de partículas são prejudiciais à saúde, sendo as  $PM_{2,5}$  mais perigosas, uma vez que devido ao seu tamanho reduzido conseguem penetrar mais profundamente no aparelho respiratório.

As partículas podem ainda ser classificadas como partículas primárias ou secundárias. Partículas primárias entram diretamente na atmosfera, pela emissão por fontes

poluentes. Partículas secundárias são formadas na atmosfera a partir da oxidação<sup>1</sup> e transformação de emissões gasosas primárias, como o SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> e COV's (compostos orgânicos voláteis, uma classe de compostos químicos e cujas moléculas contêm carbono) (EEA, 2013c).

Relativamente ao tempo de residência na atmosfera, as PM<sub>2,5</sub> têm um tempo de residência superior comparativamente às PM<sub>10</sub>. As PM<sub>2,5</sub> podem permanecer durante vários dias na atmosfera, podendo ser transportadas a longas distâncias, enquanto que as PM<sub>10</sub> têm um tempo de residência de apenas algumas horas (Rodrigues, 2013).

No que diz respeito à remoção das PM da atmosfera, os processos possíveis são por deposição seca<sup>2</sup> ou por deposição húmida, que consiste no *rainout*<sup>3</sup> e *washout*<sup>4</sup> das PM, e podem ainda ser removidas da atmosfera por ação da sedimentação e precipitação (Sousa, S., 2007).

#### Efeitos das PM

Os efeitos mais severos da poluição atmosférica são atribuídos às PM e ao ozono. Estudos epidemiológicos de longo prazo mostraram que existe uma relação entre a exposição a PM e mortalidade, a níveis inferiores aos estabelecidos pela diretriz de qualidade do ar anual da Organização Mundial de Saúde (OMS) para as PM<sub>2,5</sub> (10 µg/m<sup>3</sup>) (EEA, 2013c), o que faz das PM um dos poluentes mais importantes em termos de potenciais efeitos na saúde humana (Rodrigues, 2013).

Os problemas de saúde causados pelas partículas resultam da inalação e penetração das partículas nos pulmões e sistema sanguíneo, causando problemas respiratórios, cardiovasculares e imunológicos (EEA, 2013c). A perigosidade das partículas advém das suas dimensões, uma vez que quanto mais finas são as partículas, maior é o seu potencial de penetração nos pulmões (Rodrigues, 2013), sendo que as PM<sub>2,5</sub> estão claramente associadas a efeitos na mortalidade (EEA, 2013c).

Além dos problemas acima referidos relativamente aos impactos das PM na saúde, estas também têm efeitos adversos nas alterações climáticas e ecossistemas, e dependendo da composição química das partículas também causam problemas de corrosão nos edifícios

---

<sup>1</sup> Oxidação é o processo químico em que uma substância perde eletrões (partículas elementares de sinal elétrico negativo). Pode ainda ocorrer quando se adiciona oxigénio a uma substância ou quando uma substância perde hidrogénio.

<sup>2</sup> Consiste na deposição do poluente na superfície da Terra, no solo, plantas, água, entre outros.

<sup>3</sup> Consiste no arrastamento do poluente pela água da chuva até ao solo.

<sup>4</sup> Consiste na assimilação do poluente pelas nuvens na sua formação.

(EEA, 2013c). São evidenciados problemas de acidificação de solos e águas por deposição de partículas contendo sulfatos, nitratos e ácidos orgânicos (Sousa, S., 2007). As partículas podem ainda ser responsáveis pela inibição das trocas gasosas na vegetação (Borrego *et al.*, 2006a *in* Sousa, S., 2007).

### **b) Ozono (O<sub>3</sub>)**

O ozono é um composto que existe naturalmente na atmosfera, cujas moléculas são formadas por três átomos de oxigénio. O ozono não é emitido diretamente para a atmosfera, é formado a partir de reações químicas complexas envolvendo NO, NO<sub>2</sub> e COV's (EEA, 2013c), produzido por processos da fotólise do oxigénio molecular (Sousa, P., 2008).

Encontra-se presente sob a forma gasosa na troposfera, concentrando-se em maior quantidade na estratosfera (cerca de 90% do total existente na atmosfera), com uma forte concentração a cerca de 25 km, formando o que normalmente se chama a “camada de ozono” (Sousa, S., 2007). Nesta zona desempenha uma função extremamente importante para a existência de vida na Terra, funcionando como um filtro da radiação solar ultravioleta (Sousa, P., 2008 ; Sousa, S., 2007).

Segunda a OMS (2003) o ozono é um poluente secundário, formado pela incidência de radiação solar sobre os hidrocarbonetos e óxidos de azoto, removendo-os da atmosfera e resultando desta reação o ozono. Dependendo da dispersão de poluentes, o ozono pode ser encontrado junto da fonte de poluição ou a alguns quilómetros de distância (Sousa, P., 2008).

### Efeitos do Ozono

A elevada concentração de ozono causa vários danos na saúde humana, resultado da sua inalação, ao nível dos olhos, nariz, garganta, cabeça e vias respiratórias (Sousa, P., 2008) (Sousa, S., 2007). Além dos problemas causados na saúde, o ozono também é responsável por danos de certos materiais como borrachas, tintas, plásticos e têxteis (Sousa, P., 2008 ; Sousa, S., 2007).

Concentrações elevadas de ozono causam irregularidades ao nível da reprodução e crescimento das plantas, conduzindo à redução na produção de culturas agrícolas,

diminuição do crescimento das florestas e redução da biodiversidade (EEA, 2013c; Sousa, P., 2008).

O ozono é classificado como um dos gases de efeito de estufa (GEE) mais relevantes, pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (Sousa, S., 2007). Sendo o terceiro GEE mais relevante, depois do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e do metano (CH<sub>4</sub>), a contribuir para o aumento da temperatura da atmosfera (EEA, 2013c).

### **c) Óxidos de Azoto – NO<sub>x</sub>**

A maior parte dos óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), sigla representativa de um conjunto de gases altamente reativos, apresentam-se sobre a forma de NO (monóxido de azoto). Quando emitido para a atmosfera, o NO reage com as moléculas de oxigénio em processos fotoquímicos, formando-se dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>) (Rodrigues, 2013) (Sousa, P., 2008). O NO<sub>2</sub> está sujeito a variações sazonais, quando presente em elevadas concentrações deve-se a episódios de grande radiação solar (Araújo, 2008 *in* (Rodrigues, 2013)).

As fontes principais de NO e NO<sub>2</sub> são as elevadas temperaturas de processos de combustão, em veículos automóveis, as centrais termoelétricas, as indústrias e as fontes comerciais e residenciais de queima de combustíveis (EEA, 2013c) (Rodrigues, 2013).

A fração de NO<sub>2</sub> emitida por veículos automóveis está a aumentar significativamente devido ao aumento do número de veículos a *diesel*, cerca de 70% dos seus NO<sub>x</sub> é NO<sub>2</sub> (EEA, 2013c).

Adicionalmente às fontes de NO<sub>x</sub> antropogénicas, estes também podem ser emitidos por decomposição bacteriológica da matéria orgânica, fogos florestais e descargas elétricas ocorridas na atmosfera (Santos, 2003 *in* (Rodrigues, 2013)).

### **Efeitos dos NO<sub>x</sub>**

O NO<sub>2</sub> afeta principalmente o sistema respiratório, sendo que a exposição de curto prazo pode resultar em efeitos adversos para a saúde, tais como alterações da função pulmonar em grupos populacionais sensíveis, enquanto a exposição de longa duração pode conduzir a efeitos mais graves, como o aumento da suscetibilidade de infeção respiratória (EEA, 2013c).

Como gás solúvel, tem a capacidade de penetrar profundamente no sistema pulmonar, conduzindo a lesões ao nível dos brônquios e alvéolos pulmonares, que provocam



vários tipos de problemas respiratórios (bronquite crónica e enfisemas) (WHO, 2003). Além dos problemas respiratórios referidos, o NO<sub>2</sub> também é responsável por causar problemas de saúde a nível do fígado, baço e sangue (EEA, 2013a).

A nível ambiental os óxidos de azoto são responsáveis pela eutrofização da água<sup>5</sup>, e por contribuir para a deposição ácida, responsável pela aceleração da degradação dos monumentos em meio urbano (EEA, 2013a).

#### **d) Monóxido de Carbono (CO)**

O monóxido de carbono é um gás tóxico e incolor, emitido devido à combustão incompleta de combustíveis fósseis e biocombustíveis. Sendo que o setor dos transportes rodoviários foi durante muito tempo uma fonte significativa de emissões de CO, até à introdução de conversores catalíticos que foram responsáveis por uma diminuição significativa das emissões (EEA, 2013c).

As concentrações de CO têm tendência a variar durante o dia, segundo os padrões de tráfego automóvel. Sendo que os níveis mais altos são registados em áreas urbanas, durante os períodos de maior tráfego (EEA, 2013c). Além do transporte rodoviário, as fontes antropogénicas de CO incluem o setor do comércio, indústria e residencial (EEA, 2013a). Como fontes de origem natural, o CO é produzido em erupções vulcânicas e oceanos.

O tempo de residência do CO na atmosfera corresponde a cerca de três meses, permitindo neste período de tempo oxidar-se lentamente em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e reagindo com outros poluentes formando ozono (O<sub>3</sub>) (EEA, 2013c) Rodrigues, 2013).

#### **Efeitos do Monóxido de Carbono**

A inalação do monóxido de carbono é a única via relevante de exposição a este poluente para a saúde humana. A exposição a CO pode reduzir a capacidade de transporte de oxigénio do sangue, reduzindo a “entrega” de oxigénio aos órgãos e músculos, provocando dores de cabeça, náuseas, vertigens, falta de respiração e fadiga (EEA, 2013c); Rodrigues, 2013).

---

<sup>5</sup>Fenómeno causado pela introdução de um excesso de nutrientes na água, fortalecendo o desenvolvimento excessivo de algas. O aumento de biomassa resultante pode levar a uma diminuição do oxigénio dissolvido, provocando a morte de muitos organismos, diminuindo a qualidade da água (EEA, 2013e).

As exposições a CO de curto prazo afetam principalmente pessoas com doenças cardiovasculares, que são mais sensíveis à exposição ao CO. Exposições a níveis elevados podem provocar morte por envenenamento e coma (EEA, 2013c).

## **2.3 Enquadramento Legal**

Nas últimas décadas, a poluição atmosférica tem vindo a aumentar como consequência da industrialização e urbanização. O interesse e envolvimento da sociedade com as questões ambientais cresceu, tendo sido realçada a importância da qualidade do ar, em particular, nos centros urbanos.

Tornou-se, portanto, necessária a existência de leis que regularizem a monitorização da concentração de emissões e indicadores de qualidade do ar. Vários países instituíram regulações e a OMS designou diretrizes, de modo a proteger e conservar o ambiente e saúde humana (Zhang *et al.*, 2012).

Através da criação de objetivos de longo prazo, a Comissão Europeia (CE) definiu uma estratégia comum aos Estados Membros, de avaliação da qualidade do ar (Rodrigues, 2013).

### **Legislação Comunitária**

A Diretiva 96/62/CE do Conselho de 27 de Setembro, intitulada de Diretiva Quadro da Qualidade do Ar, relativa à avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente, foi adotada com a finalidade de evitar efeitos prejudiciais para a saúde humana e ambiente.

A diretiva tem como objetivo geral definir os princípios de base de uma estratégia comum destinada a: (i) estabelecer objetivos para a qualidade do ar ambiente na UE, com a finalidade de evitar, prevenir ou limitar efeitos nocivos sobre a saúde humana e ambiente; (ii) avaliar a qualidade do ar ambiente nos Estados Membros; (iii) dispor de informação sobre a qualidade do ar ambiente e informá-la ao público, através de limiares de alerta; (iv) melhorar a qualidade do ar ambiente (informação presente no Artigo 1º da Diretiva 96/62/CE).

A diretiva define estratégias e objetivos da CE, de modo a uniformar os procedimentos de preservação da qualidade do ar nos Estados Membros e estabelecer a ligação de informação com a Comissão Europeia (Rodrigues, 2013).

Posteriormente, surgiram quatro Diretivas Filhas (Diretivas 1999/30/CE, de 22 de Abril; 2000/69/CE, de 16 de Novembro; 2002/3/CE, de 12 Fevereiro e 2004/107/CE, de 15 de Dezembro) que estabelecem valores limites de concentrações para poluentes específicos, não estabelecidos na Diretiva Quadro.

Em 2008 surgiu a Diretiva 2008/50/CE de 21 de Maio, que num único ato legislativo agrega as disposições legais da Diretiva 96/62/CE, das suas três primeiras diretivas filhas e a Decisão 97/101/CE do Conselho, de 27 de Janeiro (Tabela 2).

Tabela 2 - Diretiva 2008/50/CE de 21 de Maio.

<b>Diretiva 2008/50/CE</b>		Relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa.
	Diretiva 96/62/CE	Relativa à avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente.
	Diretiva 1999/30/CE	Relativa a valores-limite para o dióxido de enxofre, dióxido de azoto e óxidos de azoto, partículas em suspensão e chumbo no ambiente.
	Diretiva 2000/69/CE	Relativa a valores-limite para o benzeno e o monóxido de carbono no ar ambiente.
	Diretiva 2002/3/CE	Relativa ao ozono no ar ambiente.
	Decisão 97/101/CE	Estabelece um intercâmbio de informações e de dados provenientes das redes e estações individuais que medem a poluição atmosférica nos Estados-membros.

A Diretiva 2008/50/CE define assim os princípios básicos da estratégia da UE (CAFE – *Clean Air for Europe*) relativamente à qualidade do ar. De modo a harmonizar os mecanismos de avaliação, previsão e informação ao público, e com a finalidade de

melhorar a qualidade do ar. Os objetivos de qualidade do ar são estabelecidos, de acordo com parâmetros (consultar Anexo I):

- **Valor Limite (VL)** - nível fixo com base em conhecimentos científicos, com a finalidade de evitar, prevenir ou reduzir os efeitos nocivos para a saúde humana e meio ambiente, a atingir num determinado período de tempo e que, quando atingido, não deve ser excedido;
- **Valor Alvo (VA)** - nível fixo com o objetivo de evitar, prevenir ou reduzir os efeitos nocivos na saúde humana e no meio ambiente, a atingir, num prazo determinado;
- **Limiar superior de avaliação (LSA)** - nível abaixo do qual a qualidade do ar pode ser avaliada utilizando uma combinação de medições fixas e de técnicas de modelação;
- **Limiar inferior de avaliação (LIA)** - nível abaixo do qual a qualidade do ar ambiente pode ser avaliada apenas através de técnicas de modelação.

### **Legislação Nacional**

Em Portugal, a Diretiva 2008/50/CE de 21 de Maio, foi transposta para a ordem jurídica nacional pelo Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro. Agregou também a quarta Diretiva filha (Diretiva 2004/107/CE, de 15 de Dezembro), relativa ao arsénio, cádmio, mercúrio, níquel e aos hidrocarbonetos aromáticos no ar ambiente.

O DL 102/2010, de 23 de Setembro fixa os objetivos de qualidade do ar tendo em conta as normas, orientações e os programas da Organização Mundial de Saúde, destinados a evitar ou reduzir as emissões de poluentes atmosféricos (consultar Anexo I).

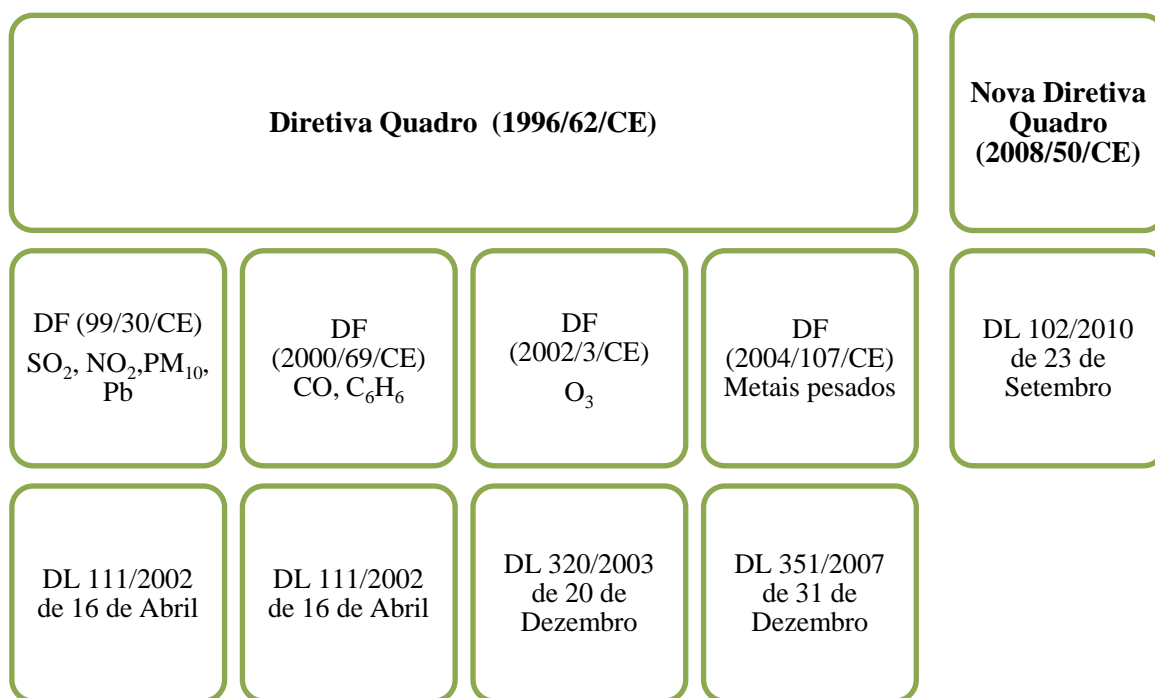


Figura 3- Transposição da Legislação Comunitária para Legislação Nacional relativa à qualidade do ar.

## 2.4 Monitorização da Qualidade do Ar em Portugal

Na avaliação da qualidade do ar, a monitorização dos poluentes atmosféricos adquire um papel preponderante na resolução dos problemas de qualidade ambiental.

Na qualidade do ar em Portugal grande parte dos dados registados que permitem determinar a qualidade do ar são recolhidos em estações de monitorização da qualidade do ar (EMQA) localizadas nas regiões urbanas, uma vez que correspondem às áreas de maior influência de tráfego automóvel, ou em zonas de predominância industrial (Monteiro, M., 2007).

Além da monitorização dos poluentes atmosféricos, na monitorização da qualidade do ar torna-se preponderante compreender os processos meteorológicos que têm a capacidade de afetar a qualidade do ar. Na próxima secção é caracterizada a rede de estações meteorológicas nacional, seguida da rede de estações de monitorização da qualidade do ar, a sua evolução e de estação e poluentes medidos.

### 2.4.1 Monitorização Meteorológica

A meteorologia representa um papel fulcral na avaliação da qualidade do ar, uma vez que são os dados meteorológicos que permitem determinar os padrões de dispersão dos poluentes.

Em ambiente urbano as condições meteorológicas apresentam padrões diferentes em relação a outros ambientes, uma vez que a atmosfera urbana apresenta um perfil característico, decorrente da complexidade da sua configuração, disposição dos edifícios, ocupação do solo e topografia (Rodrigues, 2013).

As observações meteorológicas são efetuadas tradicionalmente em dois tipos de estações: as estações sinópticas, cujo objetivo é a elaboração de cartas meteorológicas para a previsão do tempo, e as estações climatológicas, que permitem caracterizar o clima local (Monteiro, M., 2007).

Relativamente às variáveis registadas nestas estações, estas distinguem-se em dois grupos:

- Um grupo de observações diz respeito a medidas quantitativas, como é o caso da temperatura, humidade do ar, precipitação, radiação solar e pressão;
- Um segundo grupo abrange observações semi quantitativas, como é o caso da nebulosidade, tipos de precipitação e nuvens, estado do solo, etc. (Monteiro, M., 2007).

A rede nacional de estações meteorológicas automáticas de superfície (EMA) encontra-se integrada na Rede Nacional do Instituto Português do Mar e Atmosfera (IPMA), desde 2002, com 93 EMA, das quais 78 estão localizadas no Continente, 9 no arquipélago dos Açores e 6 no arquipélago da Madeira. As EMA registam os elementos meteorológicos principais de 10 em 10 minutos e elaboram automaticamente mensagens em forma de código que são enviadas à escala horária para a sede do IM e difundidas internacionalmente. Esta rede nacional de EMA permite a obtenção de dados meteorológicos em tempo real, indispensáveis à previsão do estado do tempo (IPMA, 2013).

Os parâmetros meteorológicos com influência nos processos químicos dos poluentes são vários. A radiação e a sua variabilidade devido à presença de nuvens, vapor de água, aerossóis e temperatura são fatores termodinâmicos e químicos importantes, assim como a formação de nuvens e a precipitação (Vautard *et al.*, 2012).

Os principais parâmetros de carácter meteorológico que condicionam a dispersão dos poluentes e as suas concentrações em ambiente urbano, correspondem a:

- Temperatura

Muitas reações químicas de poluentes atmosféricos dependem da temperatura. A temperatura atmosférica reflete os efeitos da radiação solar sobre a atmosfera. Consoante a camada da atmosfera, existem variações do comportamento da temperatura em relação à altitude, ocorrendo até fenómenos de inversão térmica, em que a camada de inversão funciona como barreira para os poluentes dificultando a sua dispersão.

- Precipitação

A lavagem por precipitação é o processo mais eficaz de remoção de partículas e poluentes. Dependendo da intensidade e frequência da precipitação haverá uma menor ou maior remoção dos poluentes atmosféricos. Sendo que em zonas em que a dissipação dos poluentes está condicionada por grandes edifícios ou montanhas/serras, a precipitação torna-se um eficiente mecanismo de remoção dos poluentes.

- Radiação solar

Corresponde à energia proveniente do sol e tem um papel significativo na reatividade dos poluentes atmosféricos. A radiação solar tem a capacidade de alterar a concentração dos poluentes na atmosfera, pois os poluentes reagem fotoquimicamente entre si através da ação da radiação, formando novos poluentes (por exemplo, o  $\text{NO}_x$  sob o efeito da radiação pode formar compostos como o  $\text{O}_3$ ).

- Vento

Devido à diferença de pressão atmosférica, o vento flui das áreas de alta pressão para áreas de baixa pressão. Em áreas urbanas, o vento tende a alterar rapidamente o seu comportamento, direção e velocidade devido à topografia e altura dos edifícios. Pouca circulação de vento leva à acumulação dos poluentes em determinado local, tendo a velocidade do vento um papel importante na diluição dos poluentes.

- Humidade relativa

Diz respeito à relação entre a quantidade de vapor de água presente na atmosfera (%) e a sua capacidade em reter vapor de água, a determinada temperatura. Com o aumento da temperatura, a humidade relativa tem tendência a diminuir.

## 2.4.2 Monitorização da Qualidade do Ar

A medição de concentrações individuais de poluentes na atmosfera durante um determinado período de tempo, e o registo desses dados, constituem as etapas fundamentais da monitorização de qualidade do ar (EEA, 1998).

A monitorização da qualidade do ar pode ser avaliada por monitorização contínua, através da recolha de dados em estações fixas ou campanhas experimentais efetuadas em estações móveis de medição, ou pela aplicação de modelos ou metodologias de qualidade do ar (Rodrigues, 2013) (Monteiro, M., 2007).

Em Portugal, como acima referido, a grande maioria dos dados registados que permitem avaliar a qualidade do ar são provenientes de EMQA localizadas nas regiões urbanas. As EMQA's são classificadas em três tipos, consoante o ambiente em que se inserem e consoante a influência que sofrem (Tabela 3) (CCDRN, 2012).

Tabela 3- Tipos de estação quanto ao ambiente e influência.

Classificação	Tipo	Descrição
Ambiente	Urbanas	Zona construída contínua.
	Suburbanas	Zona em parte construídas por implementação contínua de construções combinadas com zonas não urbanas (ver na revista)
	Rurais	Todas zonas que não preenchem os critérios definidos para as zonas apresentadas anteriormente.
	Tráfego	Estações em que o nível de poluição é influenciado principalmente por emissões de tráfego rodoviário.
Influência	Industrial	Estações em que o nível de poluição é influenciado principalmente por fontes industriais isoladas ou áreas industriais próximas.
	Fundo	Estações cujo nível de poluição não é influenciado pelo tráfego rodoviário ou pela indústria.

Fonte: Adaptado de (CCDRN, 2011).

Os principais poluentes monitorizados nas estações da qualidade do ar são poluentes primários como o SO<sub>2</sub>, os NO<sub>x</sub>, o CO e as partículas, sendo que no caso dos poluentes secundários, destaca-se o O<sub>3</sub> (Rodrigues, 2013).



Os dados obtidos nas estações de monitorização referentes aos poluentes mencionados são periodicamente enviados para as Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR), que têm como responsabilidade a vigilância da qualidade do ar (APA, 2013).

As redes regionais de monitorização em conjunto, formam o sistema nacional de informação de qualidade atmosférica, disponibilizado na *Base de Dados Online sobre Qualidade do Ar (QualAr)* da Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Sendo apresentados esses dados sob forma de índice diário de qualidade do ar, definido pela APA como “o índice de qualidade do ar de determinada área resulta da média aritmética calculada para cada um dos poluentes medidos em todas as estações da rede dessa área. Os valores assim determinados são comparados com as gamas de concentrações associadas a uma escala de cores sendo os piores poluentes responsáveis pelo índice” (APA, 2013).

As redes de monitorização da qualidade do ar (RMQAr) permitem a avaliação da qualidade do ar, e têm como objetivos fundamentais: medir os níveis dos poluentes no ar; divulgar informação sobre qualidade do ar sob forma de índice; assegurar e controlar o cumprimento da legislação aplicável (limites e valores legais); analisar a evolução da qualidade do ar; permitir a definição de ações de melhoria da qualidade do ar (Monteiro, M., 2007).

As RMQAr são compostas por vários tipos de estações de monitorização, que permitem operar em diferentes níveis na mesma RMQAr, permitindo realizar uma análise abrangente da avaliação da qualidade do ar e a sua gestão equilibrada (Rodrigues, 2013).

Segundo a Diretiva Quadro foram definidas zonas e aglomerações, para efeitos de avaliação da qualidade do ar. Entende-se por zonas as áreas geográficas de características homogéneas, em termos de qualidade do ar, ocupação do solo e densidade populacional e por aglomeração zonas caracterizadas por um número de habitantes superior a 250 000 ou em que a população seja igual ou fique aquém de tal número de habitantes, sendo a densidade populacional superior a 500 hab.km<sup>2</sup> (CCDRN, 2012).

### 2.4.3. Impacto dos Tetos de Emissões Nacionais

A poluição atmosférica apresenta a particularidade de percorrer longas distâncias geográficas e transpor fronteiras geopolíticas. Com a finalidade de limitar este tipo de poluição, a Comissão Europeia implementou políticas que limitam tanto fontes individuais como níveis nacionais totais de emissão de quatro poluentes atmosféricos (CE, 2014).

A Diretiva Comunitária 2001/81/EC (*Nacional Emission Ceilings Directive*, NECD) impõe limites máximos para cada Estado Membro para o total de emissões em 2010 dos compostos: dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), compostos orgânicos voláteis não metânicos (COVNM) e amoníaco (NH<sub>3</sub>) (CE, 2014).

Segundo esta diretiva, os Estados Membros devem criar e implementar um programa nacional de redução e limitação de emissões para os quatro poluentes referidos. Os Estados Membros devem ainda reportar os seus inventários de emissões à Agência Europeia do Ambiente (AEA, EEA em inglês) e à Comissão Europeia de modo a monitorizar e verificar a conformidade dos seus compromissos (CE, 2014).

Além da NECD da União Europeia, os Estados Membros juntamente com os países da Europa de Leste e Central, Estados Unidos e Canadá, têm negociado um protocolo de “vários poluentes”, sob a Convenção de Poluição Atmosférica Transfronteiriça (*Gothenburg Protocol*, promulgado em 1999). Os limites máximos de emissão do protocolo são iguais ou menos ambiciosos do que os da Diretiva NECD (CE, 2014).

Os Artigos 2º, 6, 7 e 8 da NECD estabelecem os requisitos para os Estados Membro da UE realizarem inventários, projeções e programas nacionais. Sendo que os Estados Membros devem atualizar anualmente as emissões totais nacionais.

- **Tetos de Emissões**

Segundo os limites máximos estabelecidos pela diretiva NECD, até 2010, os Estados Membros deveriam limitar as suas emissões anuais dos poluentes SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COVNM e NH<sub>3</sub>, e assegurar que esse valor não fosse atingido no futuro (EEA, 2014).

Os tetos de emissões para cada Estado Membro e para a UE-27 como um todo, estabelecidos no Anexo I da NEDC, estão presentes na Tabela 4. O cumprimento destes valores visava a diminuição de áreas de ecossistemas europeus em que são excedidos

valores críticos de acidificação, e a redução a exposição ao ozono troposférico com impactes na saúde e vegetação (EEA, 2014).

Tabela 4 - Tetos máximos de emissões de 2010, para os poluentes SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COVNM e NH<sub>3</sub>, como estabelecido no Anexo I da NEDC.

Member State	NO <sub>x</sub> (Gg)	NMVOC (Gg)	SO <sub>2</sub> (Gg)	NH <sub>3</sub> (Gg)
Austria	103	159	39	66
Belgium	176	139	99	74
Bulgaria	247	175	836	108
Cyprus	23	14	39	9
Czech Republic	286	220	265	80
Denmark	127	85	55	69
Estonia	60	49	100	29
Finland	170	130	110	31
France	810	1 050	375	780
Germany	1 051	995	520	550
Greece	344	261	523	73
Hungary	198	137	500	90
Ireland	65	55	42	116
Italy	990	1 159	475	419
Latvia	61	136	101	44
Lithuania	110	92	145	84
Luxembourg	11	9	4	7
Malta	8	12	9	3
Netherlands	260	185	50	128
Poland	879	800	1 397	468
Portugal	250	180	160	90
Romania	437	523	918	210
Slovakia	130	140	110	39
Slovenia	45	40	27	20
Spain	847	662	746	353
Sweden	148	241	67	57
United Kingdom	1 167	1 200	585	297
<b>EU-27</b>	<b>9 003</b>	<b>8 848</b>	<b>8 297</b>	<b>4 294</b>
Croatia	87	90	70	30

Fonte: (EEA, 2014)

Relativamente ao progresso da União Europeia em cumprir os tetos de emissão estabelecidos nos Anexos I e II da diretiva NECD, a Figura 4 ilustra essa evolução.

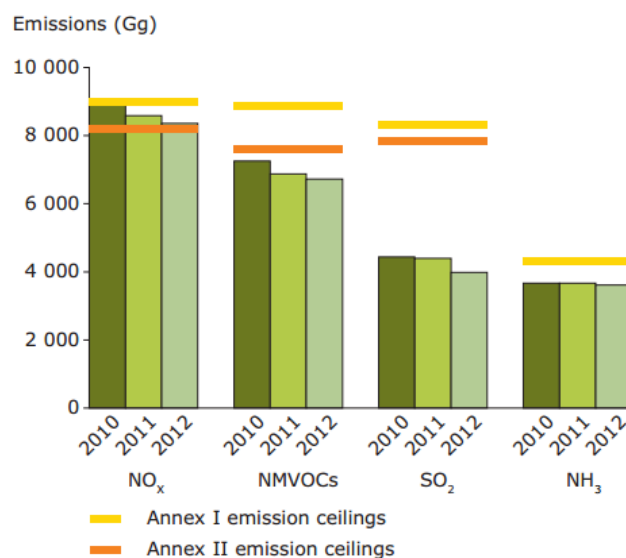


Figura 4 - Evolução da EU-27 de modo a cumprir os tetos máximos de emissão, estabelecidos nos Anexos I e II da diretiva NECD: dados sobre as emissões agregadas dos Estados Membros finais de 2010 e 2011, e provisórios de 2012, em comparação com os limites máximos (EEA, 2014).

Legenda: O amarelo está representado os tetos de emissões apresentados no Anexo I, enquanto o laranja está representado os tetos de emissões apresentados no Anexo II. As emissões estão expressas em gigagramas (Gg).

Verifica-se pela Figura 4 que para todos os poluentes, os valores finais de 2010 e 2011, e os provisórios de 2012, são inferiores do que o respetivo teto agregado de 2010 (Anexo I do NECD) (EEA, 2014).

A comparação entre dados de emissões reportados pelos Estados Membros, permitiu constatar que onze países (Áustria, Bélgica, Dinamarca, França, Alemanha, Irlanda, Luxemburgo, Malta, Holanda, Espanha e Suécia) ultrapassaram os seus tetos de emissões individuais, relativos ao NO<sub>x</sub> em 2010, oito países (Áustria, Bélgica, França, Alemanha, Irlanda, Luxemburgo, Eslovénia e Espanha) ultrapassaram esse valor em 2011, e nove países (Áustria, Bélgica, França, Alemanha, Irlanda, Luxemburgo, Eslovénia, Espanha e Malta) ultrapassaram o valor limite em 2012.

Relativamente ao COVNM, apenas um país (Luxemburgo) apresenta um valor superior ao teto estabelecido, segundo os dados provisórios de 2012. Enquanto para o NH<sub>3</sub>, três países (Finlândia, Espanha e Dinamarca) superaram o limite em 2012. Quanto ao SO<sub>2</sub>, todos os países cumpriram os valores estipulados pela diretiva NECD.

A nível nacional, o Programa para os Tetos de Emissão Nacional (PTEN), tem a finalidade de estabelecer a estratégia nacional de cumprimento dos tetos de emissões dos poluentes atmosféricos estabelecidos para 2010 na Diretiva 2001/81/CE, transposta para o direito nacional pelo Decreto-lei nº 193/2003, de 22 de Agosto (FCT/UNL, 2007).

A Digura 5 permite observar o progresso de Portugal na redução da emissão dos poluentes SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COVNM e NH<sub>3</sub>, e observar o cumprimento do teto de emissão de cada um desses poluentes estabelecidos pela diretiva NECD.

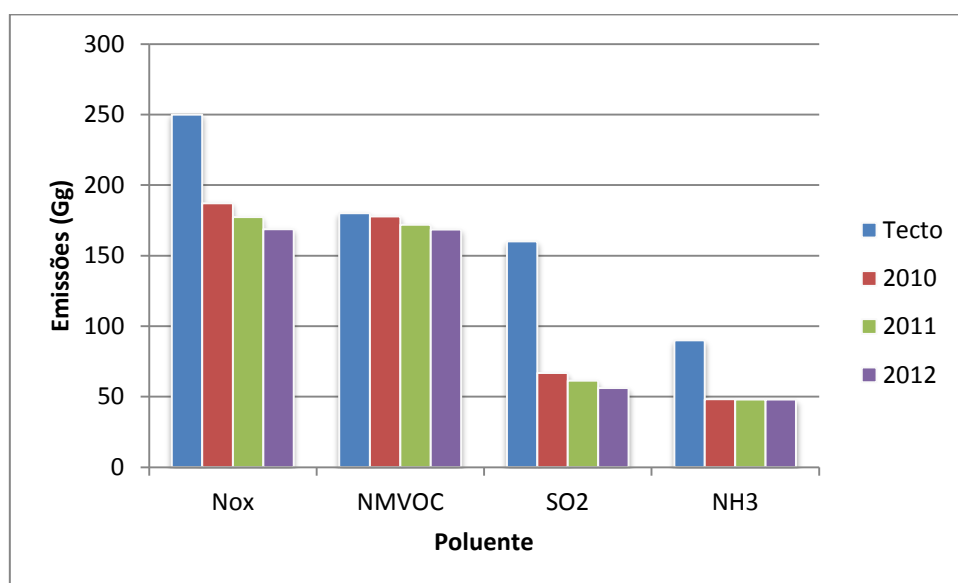


Figura 5 – Gráfico do comportamento evolutivo das emissões em Portugal (elaboração própria).

Legenda - Valores de emissões finais de 2010 e 2011, e provisórios de 2012, de Portugal, de acordo com os tetos estabelecidos na diretiva NECD.

Fonte: Elaboração própria.

## Capítulo 3

### Previsão e Modelação da Qualidade do Ar em Portugal

#### 3.1 Estado da Arte em Previsão da Qualidade do Ar

A previsão da qualidade do ar, como problema científico, surgiu como uma prioridade de extrema importância em muitos países industrializados, devido ao crescimento da consciência por parte dos governantes dos efeitos que os poluentes atmosféricos têm na saúde humana e no ambiente. Os objetivos de um sistema fiável de qualidade do ar consistem na redução eficiente da exposição da população a poluição atmosférica, melhorando a sua proteção e segurança, através de meios de divulgação de informação e planos de ação de curto prazo (Borrego *et al.*, 2011).

A Diretiva Quadro da Qualidade do Ar (Diretiva n.º 96/62/CE, de 27 de Setembro de 1996), relativa à avaliação e gestão do ar ambiente, define os princípios base de uma estratégia comum que estabelece objetivos de qualidade do ar, com a finalidade de evitar, prevenir ou reduzir possíveis efeitos nocivos para o ambiente e saúde humana. Adicionalmente, tem como finalidade avaliar a qualidade atmosférica nos Estados Membros, divulgar informação pertinente sobre a qualidade do ar ao público, e em casos de fraca qualidade do ar, exigir a implementação de ferramentas de melhoria (Europeia, 2014).

A Diretiva Quadro foi transposta em Portugal, para a ordem jurídica interna através do Decreto-Lei n.º 276/99, de 23 de Julho, e a sua implementação inicial consistiu em estabelecer uma delimitação das zonas e aglomerações para Portugal Continental e Regiões Autónomas (APA, 2008).

Além do estabelecimento de valores limite e limiares de alerta de emissões, a Diretiva Quadro frisa como prioridade futura, a necessidade de recorrer à previsão do estado da qualidade do ar (Monteiro, Ana, 2009) (Monteiro, M., 2007).

A previsão da qualidade do ar é possível quando a escolha do método de previsão é adequado, fiável e possível de fornecer resultados com uma antecipação significativa e relativa.

Os objetivos fundamentais da previsão da qualidade do ar em Portugal consistem em (i) divulgar informação em tempo real, às autoridades de proteção da saúde pública e ao público interessado, através do portal da APA ([www.qualar.org](http://www.qualar.org)); (ii) estabelecer programas estratégicos de ação de curto prazo, que permitam uma correta gestão da qualidade do ar e uma avaliação da rede de monitorização nacional (Monteiro, Ana, 2009).

Relativamente aos métodos de previsão, existem vários tipos, com diferentes graus de exigência e precisão. O método mais adequado deve ser escolhido consoante o grau de precisão pretendido e o objetivo de utilização (Monteiro, M., 2007).

Os métodos utilizados na previsão da qualidade do ar dividem-se essencialmente em dois grandes grupos: os métodos estatísticos e os métodos numéricos (USEPA, 1999).

Os métodos estatísticos são baseados no facto de que as variáveis meteorológicas e de qualidade do ar são estatisticamente relacionáveis, possibilitando o cálculo da probabilidade de excedência dos valores de concentrações dos poluentes estabelecidos por lei. Os métodos estatísticos existentes englobam: método da persistência; método fenomenológico/intuitivo; método climatológico; método “*criteria*”; método de regressão linear; redes neuronais artificiais.

- 1) **Método da persistência**, em que de modo a prever as concentrações futuras de determinado poluente, são utilizadas as suas concentrações passadas e futuras. Partindo da premissa de que as variáveis atmosféricas têm uma associação estatisticamente positiva com os seus valores históricos, esta previsão torna-se possível. Este método caracteriza-se por um desenvolvimento fácil e simples, assim como pela sua eficácia sob condições estáticas, contudo não pode lidar com mudanças bruscas de tempo, emissões, e qualidade do ar, e é usado principalmente como referência (ou base) através de outros métodos;

- 2) **Método climatológico**, baseia-se na hipótese de que a qualidade do ar é altamente dependente do clima. Permite a previsão de concentrações de poluentes atmosféricos, a partir da análise das condições climáticas extremas de determinada região. Este método é computacionalmente muito rápido, contudo devido à natureza da climatologia, este método não pode ser responsável por mudanças bruscas na qualidade do ar devido a mudanças nas emissões. Ou seja, baseiam-se essencialmente em autocorrelações entre séries temporais climáticas e históricos de concentração de poluentes;
- 3) **Método “criteria”**, é possível prever as concentrações de poluentes atmosféricos, utilizando um valor (critério) de qualidade do ar ou de variáveis de carácter meteorológicas. Tem como fundamento serem as variáveis meteorológicas ou climáticas que explicam fielmente as alterações diárias dos níveis de poluentes, apesar de que as variações diárias de emissões possam afetar a qualidade do ar. Considera-se que este método é mais eficaz na previsão da probabilidade de uma excedência, do que no nível exato de dado poluente, devendo ser utilizado como um método primário de prognóstico, ou utilizado em simultâneo com outros métodos;
- 4) **Método de Classificação e Árvores de Regressão** (*Classification and Regression Tree*, CART), trata-se de um procedimento estatístico criado para classificar dados em grupos similares ou distintos;
- 5) **Método de regressão linear** (*Regression Model*, RM), utiliza uma equação de regressão, de modo a caracterizar a relação entre a concentração de determinado poluente e os vários parâmetros meteorológicos e de qualidade do ar. Caracteriza-se por um método de operação relativamente simples, passando apenas pela criação de equações de regressão linear;
- 6) **Método de redes neuronais artificiais – RNAs** (*Artificial Neuronal Networks*, ANN), são previstos os níveis de poluição atmosférica, a partir de algoritmos computacionais desenvolvidos com o propósito de simular redes biológicas neuronais, formados por um grupo não-linear de equações e fatores de ponderação. Considera-se que a operação das redes neuronais é relativamente direta e que não requer muitos conhecimentos, em comparação com o seu desenvolvimento, que requer o conhecimento fiável dos processos meteorológicos e de qualidade do ar;



- 7) **Método fenomenológico/intuitivo**, é utilizado para formular uma previsão através da análise de informação meteorológica e de qualidade do ar. A metodologia caracteriza-se pela sua forte componente de experiência de um especialista de fenómenos atmosféricos, sendo aconselhada a combinação deste método com outros métodos de previsão, de modo a reduzir as limitações dos métodos numéricos;

Analisando os diversos métodos estatísticos apresentados, pelo grau de exatidão moderado a alto, destacam-se o método de regressão linear, CART, as redes neurais artificiais, e o método fenomenológico/ intuitivo, sendo que os restantes métodos apresentam-se com uma exatidão moderada ou baixa (USEPA, 1999).

Existem ainda **modelos de qualidade do ar de 3 dimensões (3D)**, que consistem em descrições matemáticas criadas para representar os processos atmosféricos que influenciam o transporte, dispersão e características químicas de determinado poluente atmosférico. Historicamente, Os modelos de qualidade do ar 3D foram utilizados de forma exaustiva em casos de análise de processos de ozono para estimar os efeitos das alterações de concentrações de emissões. Mais recentemente, estes modelos têm sido aplicados utilizando prognósticos meteorológicos para produzir previsões diárias de ozono.

Tabela 5- Comparação de métodos de previsão (elaboração própria, adaptado de (USEPA, 1999).

	Persistência	Climatológicos	“Criteria”	CART	Regressão Linear	RNAs	Fenomenológico/ intuitivo	Qualidade do Ar de 3D
<b>Esforço de desenvolvimento</b>	Baixo	Baixo/ moderado	Baixo/ moderado	Moderado	Moderado	Moderado/ alto	Alto	Muito alto
<b>Esforço operacional</b>	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Moderado	Moderado	Moderado	Muito alto
<b>Exatidão</b>	Baixo	Baixo	Moderado	Moderado/ alto	Moderado/ alto	Moderado/ alto	Alto	Moderado/ alto
<b>Descrição do método</b>	As concentrações observáveis de hoje ou ontem, serão as previsões de concentrações de amanhã, de determinado poluente.	A frequência histórica de picos de poluentes, irá ajudar a prever concentrações futuras.	Quando os parâmetros que influenciam dado poluente são previstos que atinjam um nível pré-determinado (critério), são previstas altas concentrações desse poluente.	Uma árvore de decisão prevê a concentração de dado poluente, baseada em valores de vários parâmetros meteorológicos e de qualidade do ar.	Uma equação de regressão prevê concentrações de dado poluente, utilizando variáveis meteorológicas e de qualidade do ar observáveis ou previstas.	Um conjunto de equações não-lineares e fatores de ponderação prevê concentrações de determinado poluente, utilizando variáveis meteorológicas e de qualidade do ar observáveis ou previstas.	Uma pessoa sintetiza informação meteorológica e de qualidade do ar, incluindo previsões de concentrações de dado poluente através de outros métodos para produzir uma previsão final da concentração desse poluente.	Um modelo de prognóstico tridimensional replica os processos meteorológicos e de qualidade do ar que criam ozono.
<b>Forças</b>	Funciona bem em áreas que têm vários dias contínuos de baixas e altas concentrações de dado poluente.	Ajuda a guiar e a prever, a partir de outros métodos.	Rápido e útil para obter uma ideia inicial sobre as condições de previsão.	Diferencia automaticamente entre os dias com concentrações de dado poluente similares.	De uso geral e fácil de operar. Produz geralmente boas previsões.	Permite o desenvolvimento de relações não-lineares para se desenvolverem.	Ajuda a moderar as previsões de outros métodos com bom senso e experiência. Normalmente tem a maior precisão.	Prevê concentrações de dado poluente em áreas que não é monitorizado.
<b>Limitações</b>	Não prevê o início ou o fim de um episódio, baixa precisão.	Não se trata de um método independente.	Não é adequado para prever concentrações exatas.	Requer uma quantidade relativa de experiência para serem desenvolvidos.	Não prevê com precisão concentrações extremas.	Não prevê com precisão concentrações extremas. Necessário 50% mais de esforço para desenvolver a regressão, com uma ligeira melhoria na precisão das previsões.	Previsão pode ser tendenciosa de um meteorologista para outro.	Método caro e difícil de desenvolver e operar.

Os modelos numéricos de previsão de qualidade do ar, assentam na descrição matemática e físico-química dos processos atmosféricos, que têm a capacidade de influenciar as concentrações de poluentes atmosféricos (transporte, dispersão e química), além da aplicação de algoritmos computacionais para a resolução dos mesmos. Este tipo de modelos incluiu informação de carácter meteorológico e dados de emissões, de modo a prever o estado físico-químico futuro da atmosfera (Monteiro, M., 2007). Contudo, para criar um sistema credível e automatizado, este tipo de modelos requer vários recursos humanos e computacionais (Monteiro, Ana, 2009).

### **Enquadramento Mundial e Nacional**

Vários países instituíram regulações e a OMS designou diretrizes, de modo a proteger e conservar o ambiente e a saúde humana. A Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) estabeleceu Padrões Nacionais de Qualidade do Ar para seis poluentes atmosféricos: dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), ozono (O<sub>3</sub>), chumbo (Pb), e partículas com diâmetros aerodinâmicos inferiores ou iguais a 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>) e de 10 µm (PM<sub>10</sub>). Na Europa, a União Europeia (UE) determinou diretivas, que posteriormente se tornaram padrões de qualidade do ar ou metas em 27 Estados Membros (Zhang Y. *et al.*, 2012).

Com a finalidade de proteger os cidadãos de ar insalubre, muitos países têm programas de previsão da qualidade do ar em tempo real (*real time air quality forecasting*, RT-AQF) locais, para prever as concentrações de poluentes de preocupações especiais para a saúde (O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub>). Essa informação é utilizada para emitir alertas de qualidade do ar iniciais, que permitem que o governo tome medidas de precaução (por exemplo: desligar temporariamente as principais fontes de emissão e de partilhar o carro ou o transporte público para reduzir a poluição do ar e evitar ou limitar sua exposição a níveis insalubres de ar poluição). Sistemas precisos de RT-AQF podem, portanto, oferecer grandes benefícios sociais e económicos, permitindo o planeamento avançado para indivíduos, organizações e comunidades, a fim de reduzir as emissões poluentes e seus impactes adversos à saúde (Zhang Y. *et al.*, 2012).

Iniciados na década de 1970, foram desenvolvidas várias técnicas de RT-AQF e ferramentas para prever a poluição do ar em áreas urbanas. Estas técnicas foram amplamente baseadas em abordagens empíricas e modelos que englobam registos

históricos da qualidade do ar e dados meteorológicos. Desde a década de 1970, o desenvolvimento dos modelos numéricos 3-D de qualidade do ar (*air quality models*, AQMs) em escalas urbanas, regionais e globais, e suas aplicações para curto e longo prazo, avançaram significativamente desde meados da década de 1990 (Zhang Y. *et al.*, 2012).

Os produtos de previsão são emitidos em termos de mapas espaciais ou valores específicos locais de concentrações horárias médias, bem como em forma de IQAr (Índice de Qualidade do Ar) (Zhang Y. *et al.*, 2012).

O IQAr trata-se de um parâmetro estatístico que permite fornecer informação ao público interessado sobre o estado da qualidade do ar, e os efeitos possíveis de provocar na saúde humana, geralmente divulgado através da Internet (USEPA, 1999). Adicionalmente, foi desenvolvido o Índice de Qualidade do Ar Comum (CAQi) que permite comparar a qualidade do ar em diferentes cidades europeias (Zhang *et al.*, 2012).

### **3.2. Divulgação da previsão e gestão da qualidade do ar**

Relativamente à qualidade do ar, a CCDR-N (Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte) é responsável pela recolha, validação e divulgação da informação resultante da medição diária de poluentes atmosféricos, obtida a partir da rede de monitorização instalada da região norte. Através da recolha destes dados, a APA (Agência Portuguesa do Ambiente) disponibiliza diariamente, através do portal [www.qualar.pt](http://www.qualar.pt), o índice de qualidade do ar na região norte, assim como os históricos diários, mensais e anuais.

A disponibilização de dados deste tipo via internet, permite formular alertas em tempo real, elaborar e implementar planos de ação de melhoria da qualidade do ar, e reduzir o tempo de exposição a níveis de fraca qualidade atmosférica à população. Deste modo o nível de sucesso de determinado programa de previsão de qualidade do ar, não está apenas dependente da precisão do método, mas também diretamente influenciado pela divulgação eficiente desse programa ao público-alvo e órgãos de gestão relacionados.

### 3.2.1 Índice de Qualidade do Ar

O Índice de Qualidade do Ar (IQAr) de determinada área, resulta da média aritmética calculada para cada um dos poluentes medidos, em todas as estações da rede dessa área. Os valores determinados são comparados com as gamas de concentrações associadas a uma escala de cores sendo os poluentes com a concentração mais elevada os responsáveis pelo IQAr. O IQAr, desenvolvido pela APA, traduz-se numa ferramenta que permite:

- i) uma classificação clara e compreensível do estado da qualidade do ar, tendo sido desenvolvido de modo a traduzir a qualidade do ar, com especial foco nas grandes aglomerações e algumas áreas industriais;
- ii) um acesso direto fácil ao público ou através dos meios de comunicação social;
- iii) responder às obrigações previstas na lei (APA, 2013).

Relativamente aos poluentes englobados no índice, o IQAr apresenta dados relativos ao dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono, medido segundo a média registada durante 8h consecutivas (CO 8h), ozono (O<sub>3</sub>), e partículas inaláveis ou finas (PM<sub>10</sub>) (APA, 2013).

As concentrações dos poluentes são apresentadas sob a forma de sistema de cores, variando de “Muito bom” a “Mau” para cada poluente de acordo com a matriz de classificação apresentada (Tabela 6), de modo a facilitar a compreensão do público e permitindo identificar facilmente as regiões mais críticas em termos de qualidade do ar (Monteiro, Ana, 2009).

Tabela 6 - Classificação do Índice de Qualidade do Ar proposto para o ano de 2014 .

Poluente / Classificação	CO		NO <sub>2</sub>		O <sub>3</sub>		PM <sub>10</sub>		SO <sub>2</sub>	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
<b>Mau</b>	10000	----	400	----	240	----	120	----	500	----
<b>Fraco</b>	8500	9999	200	399	180	239	50	119	350	499
<b>Médio</b>	7000	8499	140	199	120	179	35	49	210	349
<b>Bom</b>	5000	6999	100	139	60	119	20	34	140	209
<b>Muito Bom</b>	0	4999	0	99	0	59	0	19	0	139

Fonte: Adaptado de (APA, 2013).

No que diz respeito à gestão e atuais políticas, segundo a Legislação Nacional, sempre que se registem excedências aos valores limite de qualidade do ar estipulados, a CCDR responsável deverá elaborar Planos de Melhoria da Qualidade do Ar. Com o objetivo de implementar estas medidas, está em curso na região Norte o Programa de Execução do Plano de Melhoria da Qualidade do Ar, em conjunto com entidades públicas e privadas (CCDRN, 2013). Além do Plano Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC), existe o Programa para os Tetos de Emissão Nacional (PTEN) e a Prevenção e Controlo Integrados de Poluição (PCIP) (Monteiro, M., 2007).

### **3.3 Estado da Arte em Modelação da Qualidade do Ar**

Ao longo do tempo a avaliação da qualidade do ar tem vindo a desenvolver-se recaindo fortemente nos dados de monitorização, acarretando alguns inconvenientes. Estes passam inicialmente pelos elevados custos de investimento, seguidos dos custos operacionais envolvidos, e apresentam limitações geográficas relativas aos dados recolhidos de monitorização (Monteiro, M., 2007).

Começando na década de 1970, foram desenvolvidas várias técnicas e ferramentas de previsão de qualidade do ar, de modo a permitir prever os níveis de poluição atmosférica em áreas urbanas. Estas técnicas foram essencialmente baseadas em abordagens empíricas e modelos estatísticos criados com base em dados históricos de qualidade do ar e dados meteorológicos (Zhang *et al.*, 2012).

Os modelos de qualidade do ar, neste período, classificavam-se segundo a sua finalidade como modelos para suporte de decisões políticas e modelos para atividade de investigação (Correia, 2012). Os modelos para suporte de decisões políticas baseavam-se em descrições simplificadas dos processos físicos e químicos, e eram úteis nas simulações para longos períodos de tempo. Enquanto os modelos de cariz científico têm como base descrições com um maior grau de pormenor dos processos atmosféricos (Correia, 2012).

A modelação da qualidade do ar trata-se de uma simulação matemática que consiste na resolução de equações que simulam o comportamento de dispersão dos poluentes e os processos químicos de reação na atmosfera (Sousa, P., 2008). Além de uma ferramenta de diagnóstico da qualidade do ar, a modelação permite estimar os impactos das

variáveis meteorológicas e dos níveis de emissões nas concentrações e dispersão dos poluentes atmosféricos, de modo a elaborar planos de controlo de poluição e, prever o comportamento de poluentes emitidos por fontes fixas ou futuras (a implantar), igualmente útil na definição de estratégias de controlo de poluição. A modelação contribui ainda para a elaboração e aplicação de legislação de qualidade do ar adequada, estabelecendo valores limites de emissões que respeitam os padrões de qualidade do ar. (Correia, 2012).

Um modelo é normalmente definido como uma representação matemática da realidade, e requer dados de entrada, de entre os quais se destacam: i) as variáveis meteorológicas como velocidade e direção do vento, turbulência atmosférica, temperatura e alturas de inversão; ii) parâmetros das emissões como a localização e caracterização da fonte, velocidade de saída dos poluentes, concentração, caudal; iii) a orografia do terreno; iv) a localização e dimensões de possíveis obstruções existentes (Sousa, P., 2008) (Monteiro, M., 2007).

Como instrumento de previsão, os modelos apresentam discrepâncias temporais, não tendo a capacidade de prever a ocorrência de episódios anormais de poluição, e são normalmente específicos na previsão do comportamento de determinado poluente. Consequentemente, a investigação tem vindo a procurar soluções que minimizem estes erros e a modelação da qualidade do ar tem-se tornado num instrumento cada vez mais fiável (Sousa, P., 2008).

De acordo com o âmbito de aplicação, existem vários tipos de modelos de previsão. São considerados de **diagnóstico** quando a sua aplicação se refere a uma situação passada e de **prognóstico** quando é relativo a uma ocorrência futura. Relativamente aos tipos de modelos de previsão, também existem vários, sendo considerados três grandes grupos:

- 1) Modelos de **dispersão** – utilizados para estimar as concentrações de poluentes atmosféricos, em locais específicos, estimados a partir de uma ou mais fontes emissoras, sendo apenas considerada a dispersão dos poluentes;
- 2) Modelos **químicos de transporte** (CTM – *chemical transport models*) – são geralmente aplicados a escalas espaciais maiores e conseguem simular os efeitos de todas as fontes emissoras de determinada região, nos níveis de poluentes e na deposição dos constituintes químicos inertes ou reativos. Este tipo de modelos

considera além do transporte e dispersão dos poluentes, as reações químicas resultantes destes comportamentos;

- 3) Modelos de **recetor** – são baseados nos níveis medidos de poluentes e na composição das emissões das fontes mais importantes, de modo a calcular as suas contribuições relativas no local recetor (Monteiro, 2007 #27).

Relativamente às escalas de aplicação, são consideradas três escalas espaciais de modelação, a escala local, a mesoscala e a escala global (Mensink, 2008).

Inicialmente, a modelação da qualidade do ar começou a uma **escala local**, uma vez que nesta escala que eram identificados os focos de poluição atmosférica, como forma de determinar o impacto ambiental das fontes emissoras numa determinada área geográfica. A modelação é realizada assumindo uma distribuição gaussiana das concentrações de determinado poluente atmosférico, emitido por uma fonte e a determinada velocidade inicial e a temperatura superior à temperatura atmosférica. A **mesoscala** engloba dois tipos de escalas espaciais, a urbana (algumas dezenas de quilómetros) e a regional (alguns milhares de quilómetros), estando normalmente associada a questões ambientais que englobam uma ou mais jurisdições. Os modelos de mesoscala podem ser classificados como lagrangianos ou eulerianos. Atualmente, os problemas ambientais de poluição atmosférica são de cariz mais **global**, uma vez que constituem grandes catástrofes ambientais como o aquecimento global e diminuição da camada do ozono. Deste modo, a escala global considera o comportamento, constituição química e transporte dos poluentes atmosféricos, permitindo uma modelação mais rigorosa e eficaz (Mensink, 2008) (Monteiro, M., 2007).

Devido à formulação matemática que constitui os modelos de mesoscala, estes podem ser classificados como lagrangianos ou eulerianos. Os **modelos lagrangianos** são uma importante ferramenta para descrever o comportamento de dispersão dos contaminantes na atmosfera, tendo como principais dados de entrada a variância da velocidade, a escala de tempo lagrangiana, e a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (Maldaner e Gonçalves, 2012). Na revisão de literatura, este tipo de modelos são também chamados modelos de trajetória, uma vez que as camadas de ar na atmosfera seguem a trajetória indicada pela circulação atmosférica (Monteiro, M., 2007). Os **modelos eulerianos**, também conhecidos como modelos de grelha, apresentam uma estrutura matemática fixa à superfície terrestre. A sua estrutura é de grelha



tridimensional, considera a emissão de contaminantes atmosféricos em cada célula da grelha, sendo que os contaminantes percorrem a grelha segundo o escoamento atmosférico (Monteiro, M., 2007). Por outro lado, os **modelos eulerianos** descrevem a variação local da concentração medida num sistema de coordenadas fixo à superfície da Terra, incluindo fenómenos não lineares que ocorrem na atmosfera, como os comportamentos de transporte e dispersão, deposição e composição química dos poluentes. Como consequência, estes modelos são mais exigentes, requerendo muitos dados de entrada, que resultam frequentemente de outro tipo de modelos (dados meteorológicos e de emissões). Neste tipo de modelos é possível conjugar um módulo de carácter meteorológico com um outro de carácter químico, a três dimensões, realizando uma análise conjunta das variáveis meteorológicas e das variáveis de qualidade do ar (Arbage *et al.*, 2006) (Monteiro, M., 2007).

### 3.3.1 Modelação da Qualidade do Ar em Portugal

A pesquisa bibliográfica revelou que existem vários sistemas de previsão da qualidade do ar operacionais na Europa, sendo que alguns deles foram aplicados a nível nacional, como é o caso de Portugal.

A simulação à escala regional da qualidade do ar para Portugal Continental, requer um sistema de modelos que normalmente aplica uma malha grosseira à escala global, e refina a resolução para os focos de maior importância (Monteiro, Ana, 2009).

Atualmente existem três sistemas de previsão de qualidade do ar a operar em Portugal, com alta resolução: MM5-CHIMERE, MM5-EURAD-IM e CALIOPE, que apresentam diferentes graus de complexidade e representatividade espacial. São sistemas de escala regional, com diferentes graus de complexidade, que permitem melhorar o conhecimento das dinâmicas atmosféricas em Portugal (Borrego *et al.*, 2011) (Monteiro, Ana, 2009).

Ambos MM5-CHIMERE e MM5-EURAD-IM são sistemas de modelação aplicados por um grupo de investigação da Universidade de Aveiro (UA), no domínio da Península Ibérica (Borrego *et al.*, 2011).

O sistema de modelação **MM5-CHIMERE** está operacional desde 2007, com previsões diárias disponíveis *online* ([http://adamastor.dao.ua.pt/previsao\\_qar/](http://adamastor.dao.ua.pt/previsao_qar/)). Utiliza condições

iniciais para o domínio sob Portugal com resoluções horizontais de 10 x 10 km<sup>2</sup> (Borrego et al., 2011).

O sistema de modelação **MM5-EURAD-IM** está operacional desde 2010 e possibilita a obtenção de previsões diárias de hora em hora. Apresenta resoluções horizontais de 5 x 5 km<sup>2</sup>. Este sistema resulta de um trabalho de colaboração entre a UA e o *Rhenish Institute for Environmental Research at the University of Cologne* ([http://db.eurad.uni-koeln.de/index\\_e.html?prognose/ceur\\_e.html](http://db.eurad.uni-koeln.de/index_e.html?prognose/ceur_e.html)) (Borrego et al., 2011).

O sistema **CALIOPE** permite previsões de qualidade do ar de alta resolução sobre Espanha, e é aplicado sobre a Península Ibérica com uma resolução horizontal de 4 x 4 km<sup>2</sup>. Engloba um conjunto de modelos: o modelo meteorológico WRF-ARW; o modelo HERMES (*High-Elective Resolution Modelling Emission System*) e o modelo de transporte químico CMAQ. Estão disponíveis avaliações quase em tempo real, através deste sistema, *online* (<http://www.bsc.es/caliope>) (Borrego et al., 2011).

Em Portugal foram desenvolvidos dois sistemas de previsão quantitativos, disponíveis *online* (APA), expressos em forma de índice diário de qualidade do ar (IQA). A previsão conjunta é desenvolvida pelo Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro (GEMAC-DAO/UA) e pelo Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (DCEA-FCT/UNL) (APA, 2013).

A Universidade de Aveiro desenvolveu um sistema determinístico, resultado da conjugação do modelo meteorológico MM5 e do modelo químico CHIMERE. Este sistema engloba previsões de variáveis de carácter meteorológico, histórico de emissões e características físico-químicas de dispersão de poluentes (Monteiro, Ana, 2009).

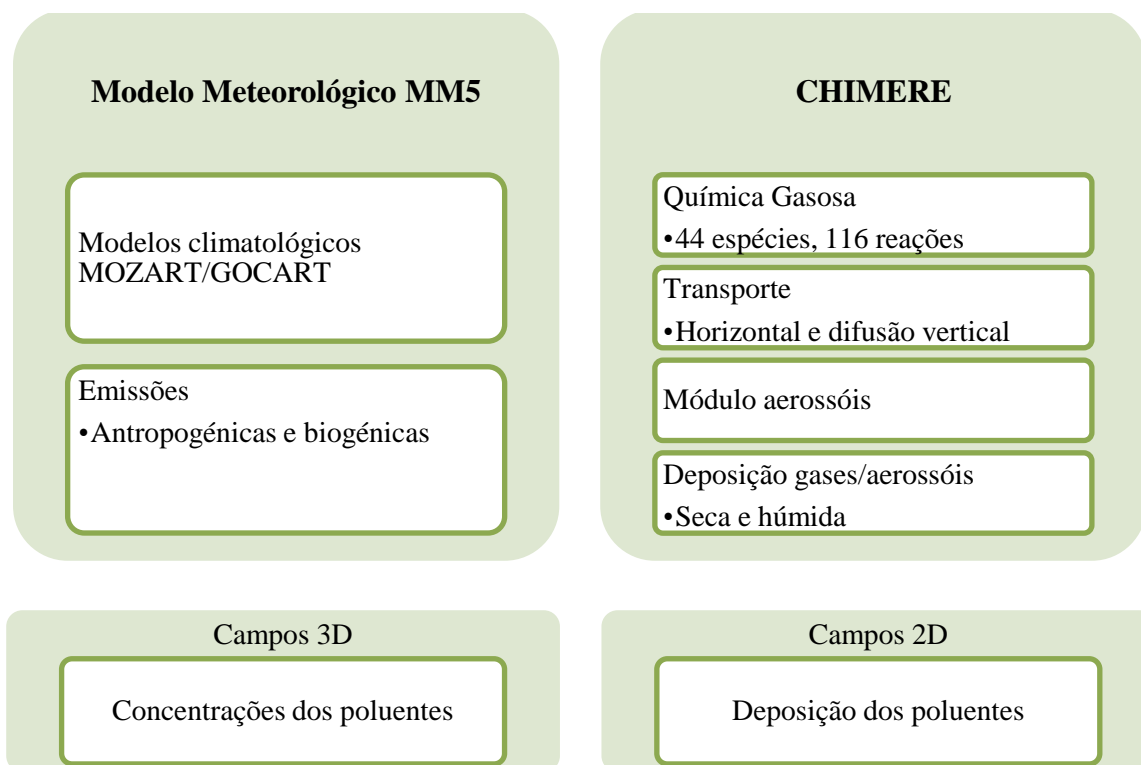
A Universidade Nova de Lisboa desenvolveu um sistema estatístico, que conjuga análises da regressão linear múltipla (RM) e regressões em árvore (CART). Segundo um conjunto de variáveis meteorológicas e de qualidade do ar, permite estimar concentrações máximas diárias de O<sub>3</sub> e concentrações médias diárias de PM<sub>10</sub>. Este sistema tem uma limitação geográfica à área Metropolitana de Lisboa e Porto Litoral (Monteiro, Ana, 2009).

## Sistema Determinístico MM5-CHIMERE

O sistema de modelos determinístico usado atualmente para a previsão da qualidade do ar é composto por dois modelos, o **modelo meteorológico de mesoscala MM5** e o **modelo químico de transporte multiescala CHIMERE** (Monteiro, Ana, 2009).

Para a aplicação e integração dos dois modelos, são necessários vários dados de entrada. O modelo meteorológico MM5 requer parâmetros de topografia, uso do solo, e dados de variáveis meteorológicas (temperatura, humidade relativa, vento, entre outros). Os dados resultantes do modelo MM5 entram no modelo CHIMERE, que é formado por quatro módulos, química gasosa, módulo “aerossóis”, transporte e deposição de gases e aerossóis (Monteiro, Ana, 2009). A Figura 6 representa um esquema simplificado do sistema determinístico MM5-CHIMERE (adaptado de (Monteiro, A.; *et al.*, 2007) (Monteiro, M., 2007)). E os aspetos principais que formam este sistema serão descritos na próxima secção.

Figura 6 - Esquema do sistema de modelos MM5-CHIMERE (adaptado de (A.; Monteiro et al., 2007) (M. Monteiro, 2007)).



O sistema MM5-CHIMERE estima de hora a hora, o nível de concentração de cada poluente no território nacional. Recorre-se ao valor máximo horário de  $O_3$  e ao valor

médio diário de concentração de  $PM_{10}$ , para a representação do índice, tendo como base os resultados do sistema numérico para as 24h do dia da previsão.

O índice de qualidade do ar é determinado, para cada poluente, segundo as classes de classificação definidas (Tabela 7). O IQA em forma de mapa de previsão, é disponibilizado *online* no site da previsão da qualidade do ar, pelo Grupo de Emissões, Modelação e Alterações Climáticas da Universidade de Aveiro (Figura 7) (GEMAC, 2014).

Tabela 7- Classes do índice de qualidade do ar do sistema determinístico.

Índice	$O_3$ ( $\mu g.m^{-3}$ )		$PM_{10}$ ( $\mu g.m^{-3}$ )	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
MUITO BOM	0.0	59.4	0.0	19.4
BOM	59.5	119.4	19.5	34.4
MÉDIO	119.5	179.4	34.5	49.4
FRACO	179.5	239.4	49.5	119.4
MAU	239.5	>239.5	119.5	>119.5

Fonte: (GEMAC, 2014).

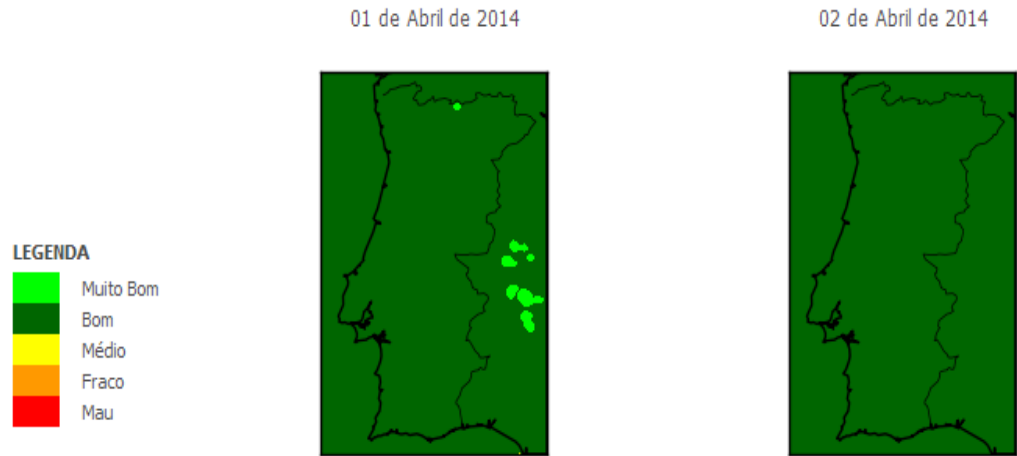


Figura 7 - Índices de qualidade do ar previstos a 31 de Março, para os dias 1 e 2 de Abril (GEMAC, 2014).

### 3.3.1.1 Modelo Meteorológico MM5

O modelo MM5 (*Fifth Generation NCAR/Penn State Mesocale Model*), foi desenvolvido no início dos anos 70 do século passado, pelo NCAR (*National Center for Atmospheric Research*, EUA), tratando-se de um modelo meteorológico à escala regional (Monteiro, Ana, 2009) (Monteiro, M., 2007).

O MM5 é um modelo não hidrostático, que tem como finalidade prever ou simular as circulações atmosféricas, em quatro dimensões (x, y, z, t), e foi desenvolvido como um modelo disponível à investigação científica (Ribeiro, I. L., 2008).

#### Geometria do Modelo

Tratando-se de um modelo tridimensional em termos espaciais, apresenta condições horizontais e verticais específicas (Figura 8) (Monteiro, Ana, 2009). De modo a que os parâmetros de níveis mais baixos não intercedem a topografia do terreno, a configuração da grelha vertical é definida por coordenadas sigma (Ribeiro, I. L., 2008):

$$\sigma = \frac{p_i - p_t}{p_s - p_t} \quad (3.1)$$

Em que  $p_i$  corresponde à pressão de nível  $i$ ,  $p_t$  à pressão de topo e  $p_s$  à pressão à superfície.

Além da pressão e velocidade vertical, definida no limite de cada nível vertical, as outras variáveis são definidas ao nível *half-sigma* (a tracejado na Figura 8 (a)) (Monteiro, Ana, 2009).

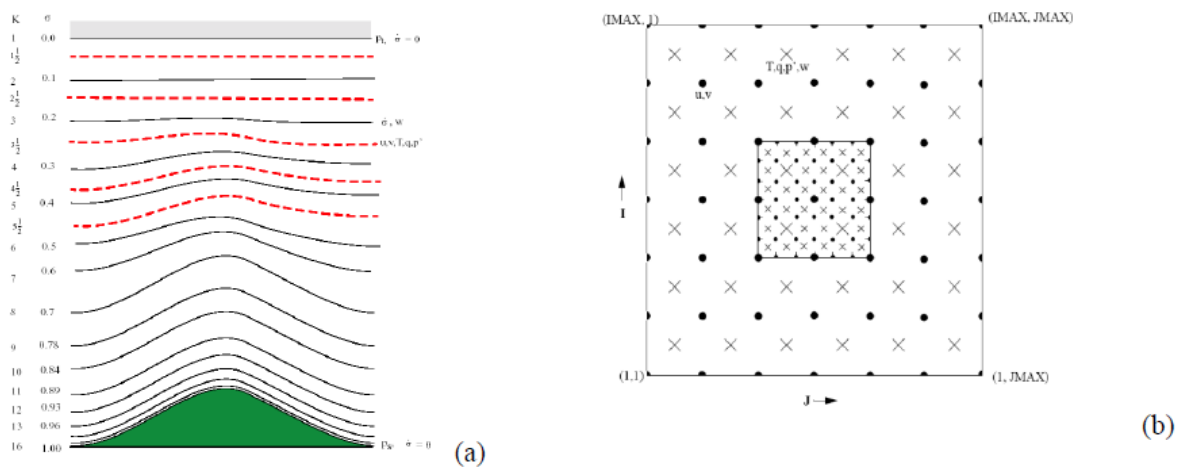


Figura 8 - Configuração vertical (a) e horizontal (b) do modelo meteorológico MM5 (Ana Monteiro, 2009).

Relativamente às variáveis escalares horizontais, estas definem-se no centro de cada célula, bem como a componente vertical do vento ( $w$ ) (Figura 8 (b)). Enquanto que as componentes horizontais do vento ( $u$  e  $v$ ) são configuradas nos cantos das células, sendo que como consequência, a grelha horizontal tem uma configuração *Arakawa-Lamb B*. Os centros das células referenciam-se com X e os cantos com pontos (Figura 8 (b)) (Ribeiro, I. L., 2008).

Para a aplicação do modelo MM5 é necessária informação sobre a topografia e uso do solo, análise meteorológica proveniente de um modelo à escala global ou regional (vento, temperatura relativa, pressão média do nível médio do mar, entre outros) e, caso necessário, dados relativos a rádio-sondagens e dados de superfície. Na Figura 9 está representado os módulos numéricos inerentes ao modelo que constituem o sistema MM5 (Monteiro, Ana, 2009).

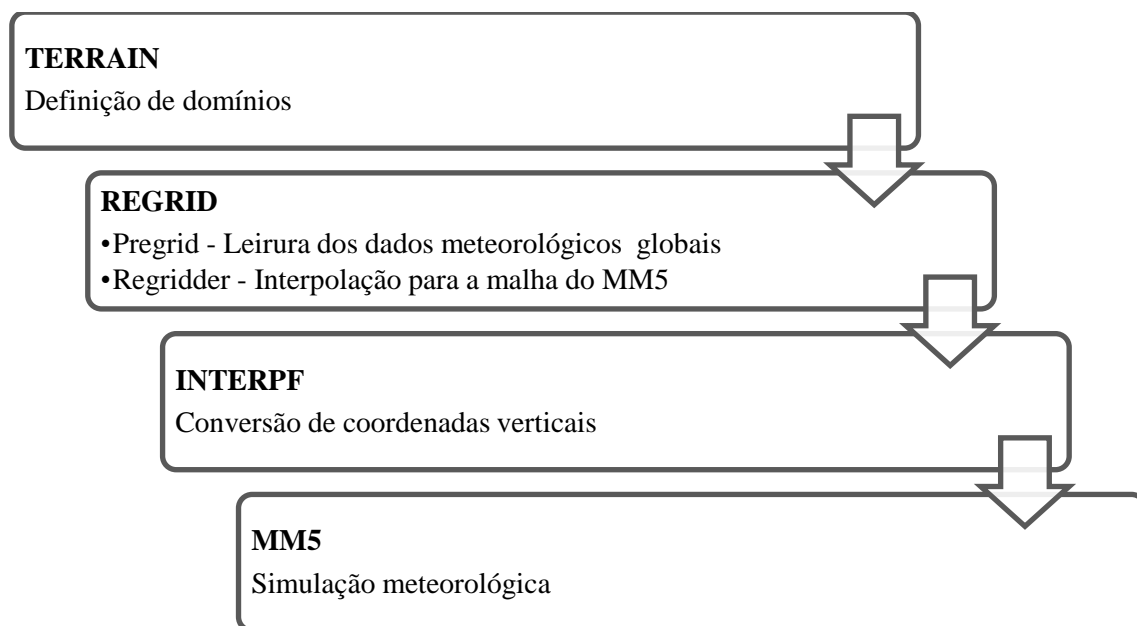


Figura 9 - Módulos do sistema de modelação MM5 (adaptado de (I. L. Ribeiro, 2008)).

O modelo MM5 tem início com o módulo TERRAIN, que realiza a interpolação da topografia e as classes de uso do solo, para domínios de mesoscala. O TERRAIN determina ainda algumas constantes como a latitude, longitude, parâmetro de Coriolis e fatores de escala dos mapas associadas aos domínios, necessárias ao sistema de modulação (Ribeiro, I. L., 2008).

Posteriormente à seleção dos dados pretendidos, estes vão integrar o módulo REGRID. Este módulo tem como objetivo a interpolação das condições iniciais e de fronteira para os níveis isobáricos da grelha calculada pelo TERRAIN (Monteiro, Ana, 2009). O módulo REGRID incorpora dois subprogramas: *Pregrid* e *Regrider*. O *Pregrid* é responsável por ler os dados meteorológicos e transformá-los num formato intermédio, enquanto que o *Regrider* interpola para a grelha do MM5 as variáveis meteorológicas (temperatura, componentes horizontais do vento, humidade relativa, altura dos níveis de pressão, pressão ao nível do mar e temperatura da superfície do mar) (Ribeiro, I. L., 2008).

Na fase seguinte, verifica-se a passagem dos níveis isobáricos a coordenadas sigma (sistema de coordenadas do MM5), ou seja, a transformação vertical dos dados meteorológicos. É no módulo INTERPF que é realizada esta transformação, através da criação de campos 2D e 3D para a velocidade e direção do vento, temperatura, humidade, pressão, condições iniciais, de fronteira laterais e de superfície, iniciando a simulação meteorológica. Tendo todos os dados necessários e no formato adequado, o modelo MM5 encontra-se operacional. Este módulo de simulação meteorológica, fornece dados de temperatura, velocidade e direção do vento, humidade relativa e radiação, em campos 3D, assim como a altura geopotencial (Ribeiro, I. L., 2008).

O modelo MM5 pode ser usado em investigações que envolvam sistemas de convecção de mesoscala, brisas marítimas, circulação de massas de ar provocadas pela topografia do terreno e zonas urbanas, a uma resolução entre os 2 e os 200 km (Monteiro, Ana, 2009). Adicionalmente, este modelo está apto a executar em simultâneo e com interação, vários *nestings*<sup>6</sup> que podem ocorrer de duas formas: i) um sentido (*one-way nesting*), em que as condições simuladas para o domínio-mãe são usadas para a previsão num domínio mais fino; ii) em dois sentidos (*two-way nesting*), onde ocorre uma troca de informação entre domínios em cada intervalo temporal, sendo possível refinar os resultados do domínio de menor resolução em comparação com o domínio de maior resolução (Ribeiro, I. L., 2008).

---

<sup>6</sup> *Nesting* diz respeito à capacidade de *zooming* espacial de um modelo, utilizando dados da simulação de maior escala, como *inputs* para a simulação de menor escala.

### Aplicação do Modelo MM5

O modelo MM5 já foi validado em Portugal para a previsão de qualidade do ar, e é utilizado em duas etapas recorrendo à técnica de “*one-way nesting*”. Sendo que a primeira diz respeito à escala europeia com uma resolução de  $54 \times 54 \text{ km}^2$  (MM5-EUR) e a segunda corresponde do domínio de Portugal Continental, com uma resolução de  $9 \times 9 \text{ km}^2$  (MM5-PT) (Figura 10) (Ribeiro, I. L., 2008).

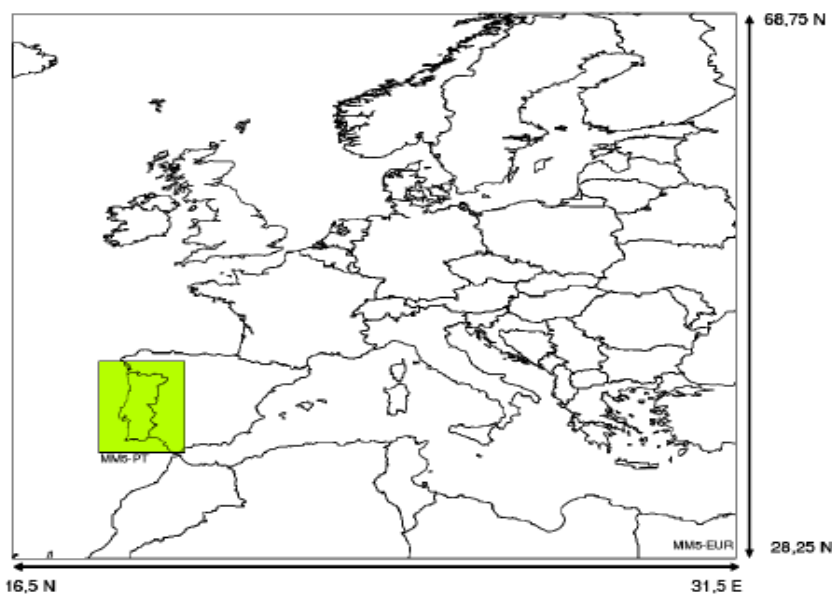


Figura 10 - Domínio de simulação do modelo MM5 para aplicação no sistema de previsão da qualidade do ar, em Portugal Continental (I. L. Ribeiro, 2008).

#### **3.3.1.2 Modelo Químico de Transporte CHIMERE**

O CHIMERE é um modelo químico de transporte, a três dimensões, que se baseia na solução da equação de continuidade Euleriana para simular os campos de concentração e deposição de vários compostos químicos (Monteiro, A.; *et al.*, 2007) (Monteiro, M., 2007). Este modelo foi concebido para realizar simulações de previsão de longo prazo e episódicas (Monteiro, M., 2007).

Trata-se de um modelo que tem vindo a ser usado em várias aplicações científicas, entre as quais inclui-se a sensibilidade a emissões antropogénicas e biogénicas, diagnóstico de emissões e previsões sobre a Europa e a região de Paris (Monteiro, A.; *et al.*, 2005).



## Geometria do Modelo CHIMERE

A grelha horizontal de simulação do modelo CHIMERE é definida pelo utilizador, dependendo do domínio de estudo requerido. Tendo a capacidade de utilizar técnicas simples de *nesting*, não é necessário que a grelha seja idêntica à do modelo MM5, podendo ser efetuadas interpolações se necessário (Monteiro, Ana, 2009) (Ribeiro, I. L., 2008).

A geometria vertical do modelo utiliza um sistema de coordenadas *sigma-P*, sendo a pressão no topo de cada nível  $k$ , calculada pela fórmula:

$$p_k = a_k 10^5 + b_k p_{surf} \quad (3.2)$$

Em que os coeficientes híbridos  $a_k$  e  $b_k$ , são definidos de forma automática ou facultados pelo utilizador, fornecendo a pressão no topo e o valor de “sigma” no topo da camada superficial e a resolução vertical segundo uma progressão geométrica (Monteiro, M., 2007).

O modelo CHIMERE foi aplicado inicialmente à escala continental (desde 10.5°W a 22°E e 57.5°N, Figura 11), sendo posteriormente aplicado a Portugal. A simulação no domínio nacional foi realizada recorrendo a um domínio horizontal de 290 km × 580 km e uma resolução horizontal de 10 km (Monteiro, A.; *et al.*, 2007).

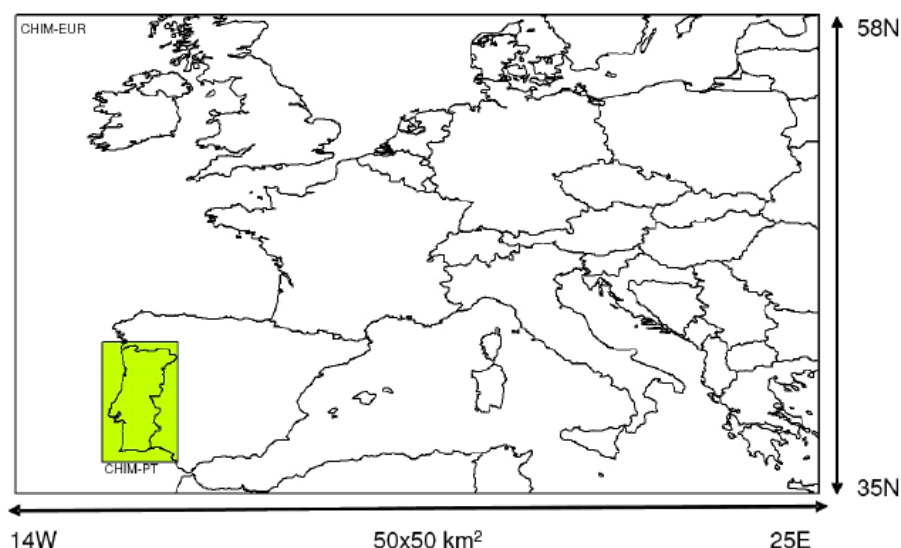


Figura 11 - Domínios geográficos utilizados pelo modelo CHIMERE (A.; Monteiro et al., 2007).

Relativamente ao domínio vertical do modelo, este tem uma extensão de 3 km, dividido em níveis de pressão (*sigma-P*) que correspondem aos valores aproximados de 50, 250, 600, 1200, 2000 e 3000m (Monteiro, A.; *et al.*, 2005).

### Dados de Entrada

O CHIMERE é um modelo que tem vindo a ser adaptado a vários tipos de dados de entrada. Requer dados meteorológicos, valores de emissões, informação de uso do solo e de condições fronteira (INERIS *et al.*, 2013).

Relativamente aos dados de entrada, este modelo necessita de dados provenientes do modelo meteorológico MM5, que incluem variáveis 2D e 3D, resumidas na Tabela 8.

Tabela 8 - Variáveis de saída do modelo MM5 necessárias para o modelo químico CHIMERE.

Variável		Objetivo
2D	• Atenuação da radiação	• Química/fotólise
	• Velocidade de atrito	• Processos de mistura
	• Temperatura a 2 metros	• Deposição e emissões biogénicas
	• Altura da camada de mistura	• Processos de mistura e deposição
	• Comprimento de Monin-Obukhov	• Processos de mistura
	• Velocidade convectiva	• Processos de mistura
	• Resistência aerodinâmica	• Deposição
	• Taxa de precipitação total	
3D	• Vento horizontal	• Transporte
	• Temperatura	• Química e termodinâmica
	• Massa volúmica	• Química e transporte
	• Humidade específica	• Química e termodinâmica
	• Altura dos níveis verticais	• Geometria do modelo
	• Fração de água líquida nas nuvens	• Química em fase aquosa e scavenging de aerossóis

Fonte: (M. Monteiro, 2007).

As condições de fronteira (de topo e laterais) usadas para a escala europeia, são simuladas pelo modelo climatológico de transporte global GOCART, para espécies gasosas e aerossóis. No que diz respeito às partículas, o modelo GOCART simula sete tipos de compostos (como as PM<sub>10</sub> e sais marinhos) (Monteiro, Ana, 2009) (Monteiro, M., 2007). São fornecidos dados pelo Instituto Max-Planck, Hamburgo (INERIS *et al.*, 2013).

Os dados relativos a topografia são fornecidos pelo modelo MM5 e os de uso do solo são fornecidos pela base de dados “Global Land Cover Facility” (GLCF), Universidade de Maryland (INERIS *et al.*, 2013).

Relativamente aos dados de entrada de emissões, o modelo químico precisa de valores de emissões horárias de NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, Etano, n-Butano, Eteno, Propeno, Isopropeno,  $\alpha$ -pireno, *o*-xileno, Formaldeído, Acetaldeído e Metil-etil-cetona (Monteiro, A.; *et al.*, 2005). Usualmente são fornecidos por bases de dados locais, á escala europeia são utilizados os valores das emissões anuais dos inventários EMEP (*The European Monitoring and Evaluation Programme*), e a nível nacional no INERPA (Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas) (INERIS *et al.*, 2013; Monteiro, M., 2007).

### **3.3.3. Modelos baseados em Inteligência Artificial**

O desenvolvimento de modelos com base em inteligência artificial exige a aplicação de técnicas designadas como não paramétricas. Estas consideram a relação existente entre os dados de entrada (*input*) e os dados de saída (*output*), e quando aplicadas apresentam uma performance promissora, uma vez que reconhecem e aprendem relações complexas e não lineares entre as variáveis, que não são possíveis recorrendo a métodos convencionais. Estes tipos de modelos dividem-se em duas categorias, as Redes Neurais Artificiais e ainda *Data-mining models*.

#### **Redes Neurais Artificiais (RNAs)**

Na temática das técnicas de previsão, a importância e aplicabilidade das redes neurais artificiais (RNAs) já é vastamente reconhecida.

As RNAs são técnicas computacionais cujo modelo matemático é inspirado na estrutura neuronal de organismos inteligentes, de forma a recriar o funcionamento do cérebro humano, em que o conhecimento é adquirido por experiência. No sistema nervoso os neurónios são as unidades básicas, que têm a capacidade de comunicar entre si, processando a informação e transpor a mesma numa resposta. De forma semelhante, numa RNA também existem unidades básicas (neurónios), interligadas entre si, sendo que cada ligação tem um determinado “peso” atribuído (Lopes, 2010).

Cada uma destas unidades de funcionamento consiste na soma ponderada das suas entradas, adicionando um termo de polarização constante. A saída está condicionada pela presença de uma função de ativação ou de transferência, que pode ser caracterizada como linear, sigmoide ou tangente hiperbólica (Figura 12).

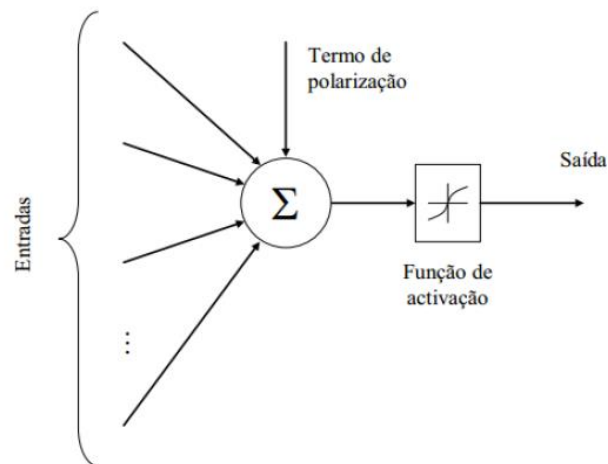


Figura 12 - Estrutura de uma unidade de uma rede neuronal (Lopes, 2010).

A arquitetura e topologia da rede neuronal são definidas pela organização das unidades que compõe a rede. Nas redes de alimentação direta (unidirecionais) as unidades são distribuídas por camadas (redes multicamada), com uma camada de entrada, uma ou mais camadas intermédias, usualmente denominadas camadas ocultas, e uma camada de saída (Figura 13). As unidades podem partilhar as mesmas entradas, mas não são conectadas entre si. A camada de entrada tem como finalidade receber os dados, sendo de seguida propagados à seguinte camada sem processamento. O processamento dos dados é realizado nas camadas escondidas e na camada de saída (Ribeiro, J., 2014).

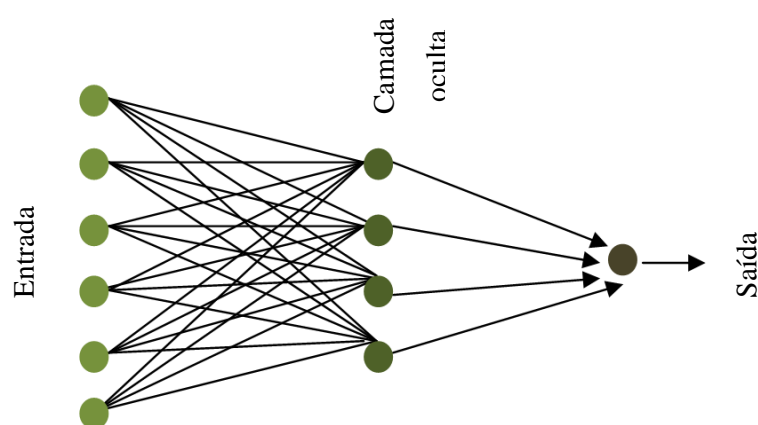


Figura 13 - Exemplo de rede neuronal (elaboração própria).

Ao criar uma rede RNA, é importante ter em consideração o grau de complexidade da mesma, é necessário existir um equilíbrio entre a complexidade e a simplicidade, de

modo a que a rede tenha um poder de processamento credível. Uma rede que englobe demasiadas variáveis, pode induzir num aumento do ruído impossibilitando a obtenção de resultados válidos. Contudo uma rede demasiado simples pode não produzir resultados corretos (sub ajustamento dos dados).

As RNAs são classificadas como unidirecionais (*feedforward*) ou recorrentes (*feedback*). As mais utilizadas são do tipo *feedforward*, que opera de forma progressiva sem entrada de informação adicional acerca dos processos a jusante (sem realimentação). Enquanto as redes de *feedback* têm as conexões entre neurónios em sentido contrário, com realimentação (Ribeiro, J., 2014).

# Capítulo 4

## Caracterização do Caso de Estudo

### 4.1. Enquadramento Geográfico

O Porto é uma cidade situada no noroeste de Portugal e pertencente à região Norte (Figura 14) e sub-região do Grande Porto. A cidade do Porto tem uma área de 41,42 km<sup>2</sup> do território nacional, incluindo 3 Uniões de freguesias e 4 Freguesias: União das freguesias de Aldoar, Foz do Douro e Nevogilde; União de Cedofeita, Santo Ildefonso, Sé, Miragaia, São Nicolau e Miragaia, União de Lordelo do Ouro e Massarelos; Bonfim; Campanhã; Paranhos, Ramalde e Vitória.

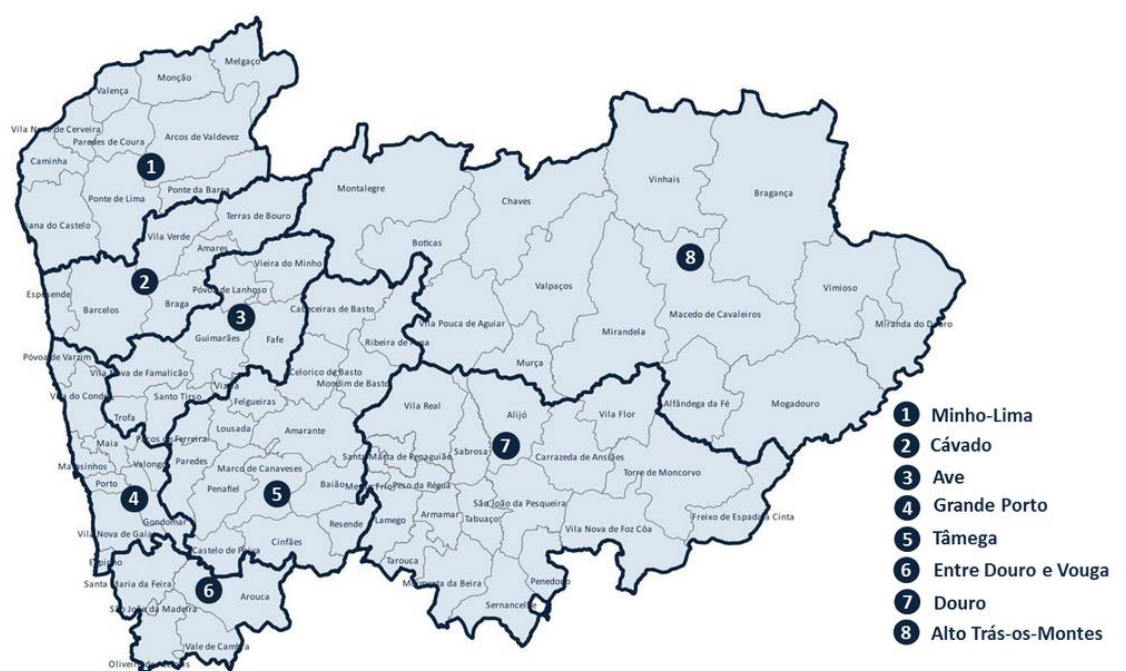


Figura 14 - Mapa da região Norte (CCDRN, 2014).

As sub-regiões da região Norte apresentam características morfoclimáticas, socioeconómicas, demográficas e de povoamento, muito distintas entre si.

Apresentando deste modo uma grande heterogeneidade a nível de ordenamento do território, e consequentemente, do ambiente.

Na Figura 15 constata-se que a região Norte está dividida em duas zonas de classificação climática. A zona litoral é classificada como “Cfa”, clima temperado sem estação seca e com Verão quente, e a zona mais para o interior está classificada como “Csa”, clima temperado com Verão seco e quente (IM e AEmet, 2011).

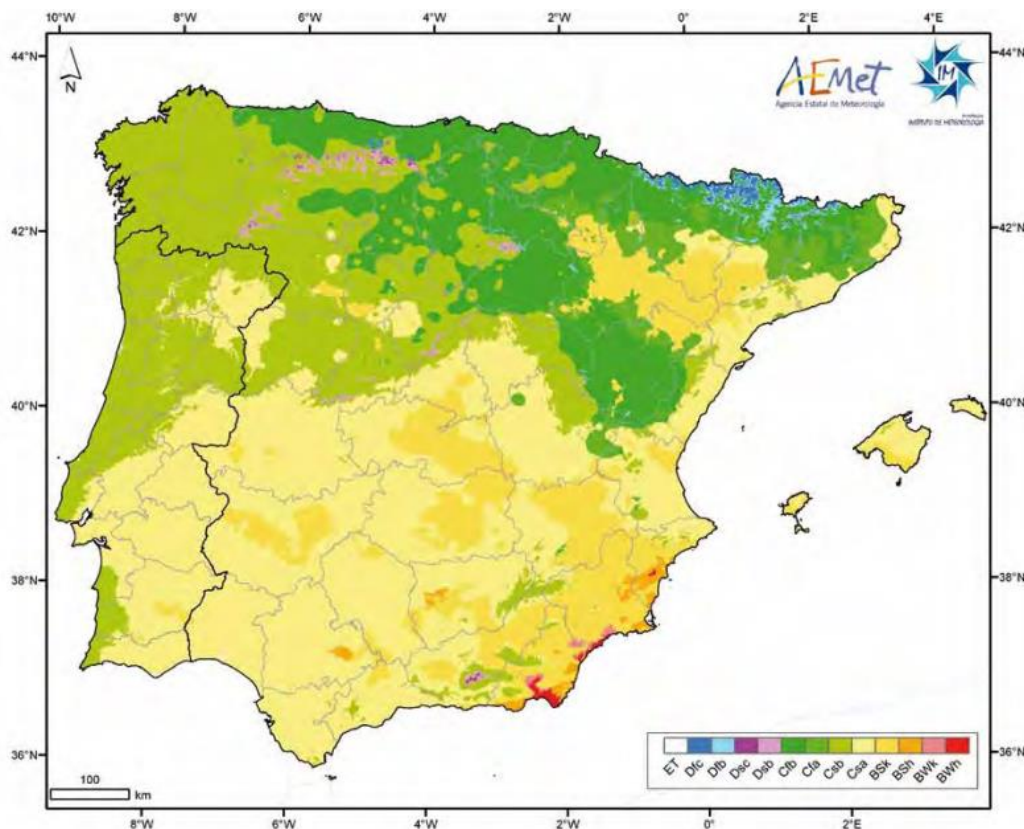


Figura 15 - Classificação climática de Köppen-Geiger na Península Ibérica e Ilhas Baleares (IM & AEmet, 2011).

## 4.2. Caracterização socioeconómica

Nas últimas décadas, o nosso país tem verificado um grande crescimento das cidades a litoral e uma desertificação nas áreas mais no interior do país. As zonas do litoral foram vistas como áreas de oportunidades profissionais, devido à localização das grandes indústrias nacionais, e que deste modo permitiam maior poder económico para as famílias.

Esta alteração provocou um forte aumento a nível de infraestruturas nas cidades, de modo a garantir o bem-estar da população, e este *boom* de construção veio pôr em causa o conceito de cidades sustentáveis. A exploração dos recursos que ocorreu no

litoral para acompanhar este crescimento, resultou num aumento da produção de resíduos, poluição de água e solos, assim como no aumento do consumo de água e energia.

Segundo os dados do Censos 2011 elaborados pelo Instituto Nacional de Estatística (INE), em 2001 o distrito do Porto possuía uma população residente de 1.781.836 habitantes (Figura 16), e em 2011 já possuía 1.817.172 habitantes (Figura 17) (INE, 2014).

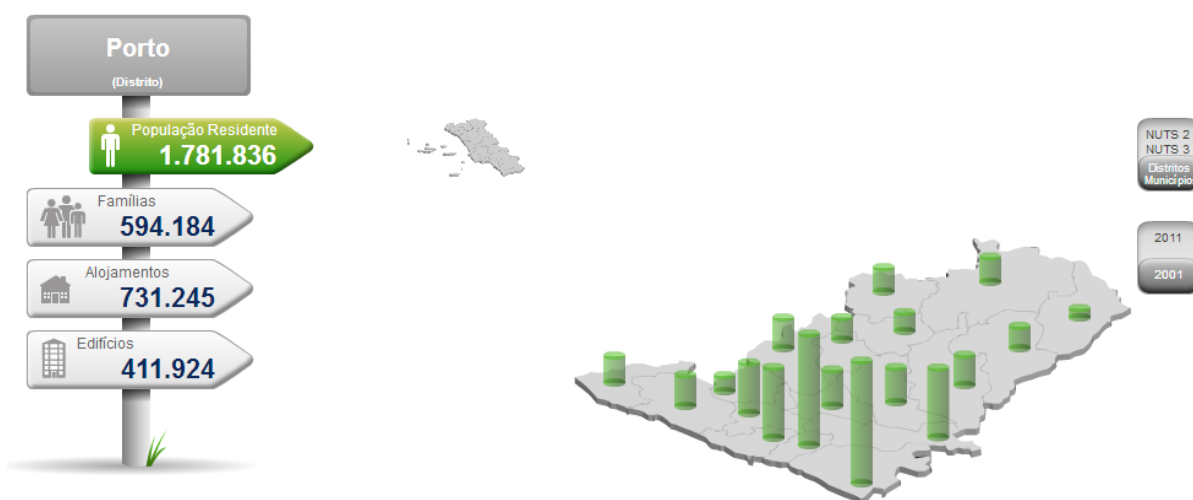


Figura 16 - Distribuição da população residente no distrito do Porto, em 2001 (INE, 2014).

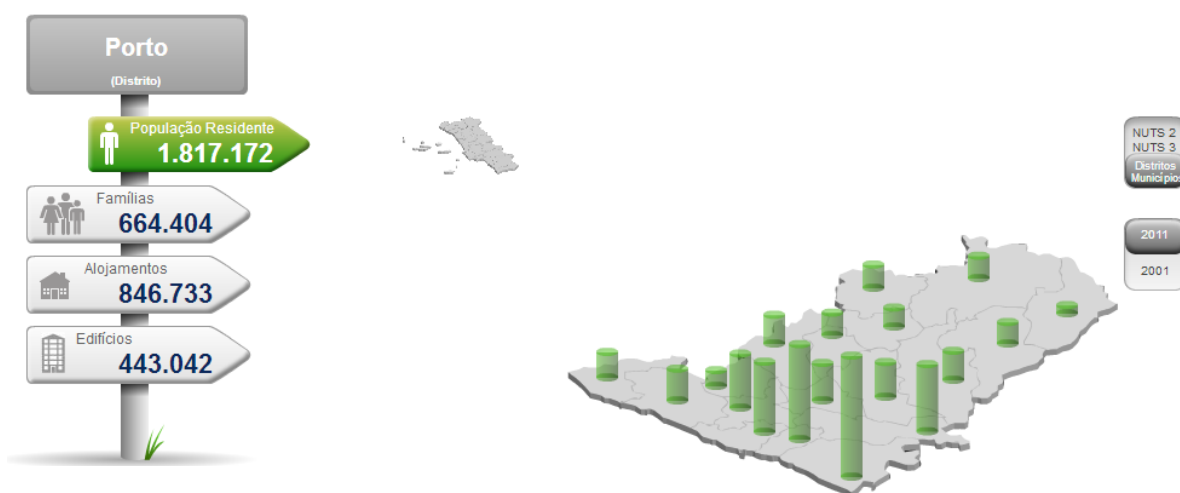


Figura 17 - Distribuição da população residente no distrito do Porto, em 2011 (INE, 2014).



Sendo importante salientar o crescimento da população residente no distrito do Porto entre 2001 e 2011 (Figura 16 e 17), assim como o número de famílias, alojamentos e edifícios.

### 4.3 Monitorização da Qualidade do Ar

Relativamente às definições de a RMQA, tal como definido no subcapítulo 2.2.2, a Região Norte é formada por quatro aglomerações (Porto Litoral, Vale do Ave, Vale do Sousa e Braga), e por duas zonas (Norte Litoral e Norte Interior).

Sendo a rede de medida composta por vinte e quatro estações de monitorização de qualidade do ar (Figura 18), geograficamente distribuídas por dezasseis Concelhos: Porto, Maia, Matosinhos, Valongo, Gondomar, Vila do Conde, Vila Nova de Gaia, Espinho, Paredes, Paços de Ferreira, Braga, Vila Nova de Famalicão, Guimarães, Santo Tirso, Vila Real e Viana do Castelo (CCDRN, 2012).

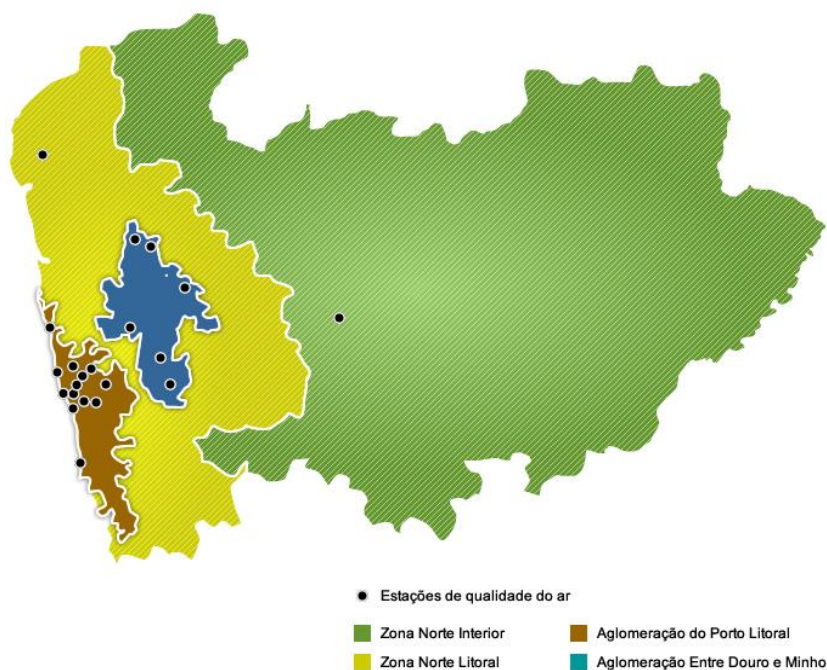


Figura 18 - Rede de medida da qualidade do ar da Região Norte (CCDRN, 2012).

As estações de monitorização da RMQA da Região Norte estão equipadas com analisadores automáticos que medem, de forma contínua e registam as concentrações médias dos poluentes: CO, NO<sub>x</sub> (NO, NO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>), SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> e BTX<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> **BTX** é a sigla atribuída para uma mistura formada pelos hidrocarbonetos benzénicos, substâncias químicas que apresentam índices de otanagem elevados.

A cada poluente atmosférico está associado um método de medição, utilizados na monitorização em contínuo, e a recolha diária dos dados e o seu armazenamento é efetuado de forma automática, numa base de dados. Após a validação diária, esses dados são enviados para *Base de Dados Online sobre Qualidade do Ar (QualAr)* da APA (Agência Portuguesa de Ambiente) (CCDRN, 2012).

Esta investigação apresenta como caso de estudo a região do Porto Litoral, e na Tabela 10 apresentam-se as estações que compõem a Rede de Medida da Qualidade do Ar da Região Norte, em particular a aglomeração/zona Porto Litoral, em 2011 e os poluentes nelas monitorizados.

Tabela 9 - Características das estações de medida de qualidade do ar da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte, da aglomeração Porto Litoral.

<b>Estação</b>	<b>Tipo de Ambiente</b>	<b>Tipo de Influência</b>	<b>Data de Início</b>	<b>Poluentes</b>
<b>Mindelo – Vila do Conde</b>	Urbana	Fundo	Dez. 2009	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub> e O <sub>3</sub>
<b>Meco - Perafita</b>	Urbana	Industrial	Ago. 2002	SO <sub>2</sub> , BTX, PM <sub>10</sub> , O <sub>3</sub>
<b>Francisco Sá Carneiro (Campanhã - Antas)</b>	Urbana	Tráfego	Out. 2000	CO, NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> e PM <sub>10</sub>
<b>Anta - Espinho</b>	Suburbana	Fundo	Fev. 2011	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub> e O <sub>3</sub>
<b>Ermesinde – Valongo</b>	Urbana	Fundo	Out. 1998	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub> , e O <sub>3</sub>
<b>Vila Nova da Telha - Maia</b>	Suburbana	Fundo	Out. 1998	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub> e O <sub>3</sub>
<b>D. Manuel II</b>	Urbana	Tráfego	Nov. 1999	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub> e PM <sub>2,5</sub>
<b>Leça do Balio - Matosinhos</b>	Suburbana	Fundo	Out. 1999	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub> e O <sub>3</sub>
<b>Custóias - Matosinhos</b>	Urbana	Fundo	Set. 1998	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub> e O <sub>3</sub>
<b>João Gomes Laranjo – Senhora da Hora</b>	Urbana	Tráfego	Set. 2001	CO, NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> e PM <sub>10</sub>
<b>Sobreiras – Lordelo do Ouro</b>	Urbana	Fundo	Dez. 2007	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub> e O <sub>3</sub>
<b>Avintes (Parque Biológico de Gaia – Avintes)</b>	Urbana	Fundo	Jul. 2010	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub> e O <sub>3</sub>

Fonte: Adaptado de (CCDRN, 2013).

## 4.4. Caso de Estudo

O Concelho do Porto está inserido na Aglomeração Porto Litoral e tem implementadas duas estações de monitorização da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar (RMQA): Francisco Sá Carneiro-Campanhã (Antas) e Sobreiras-Lordelo do Ouro.

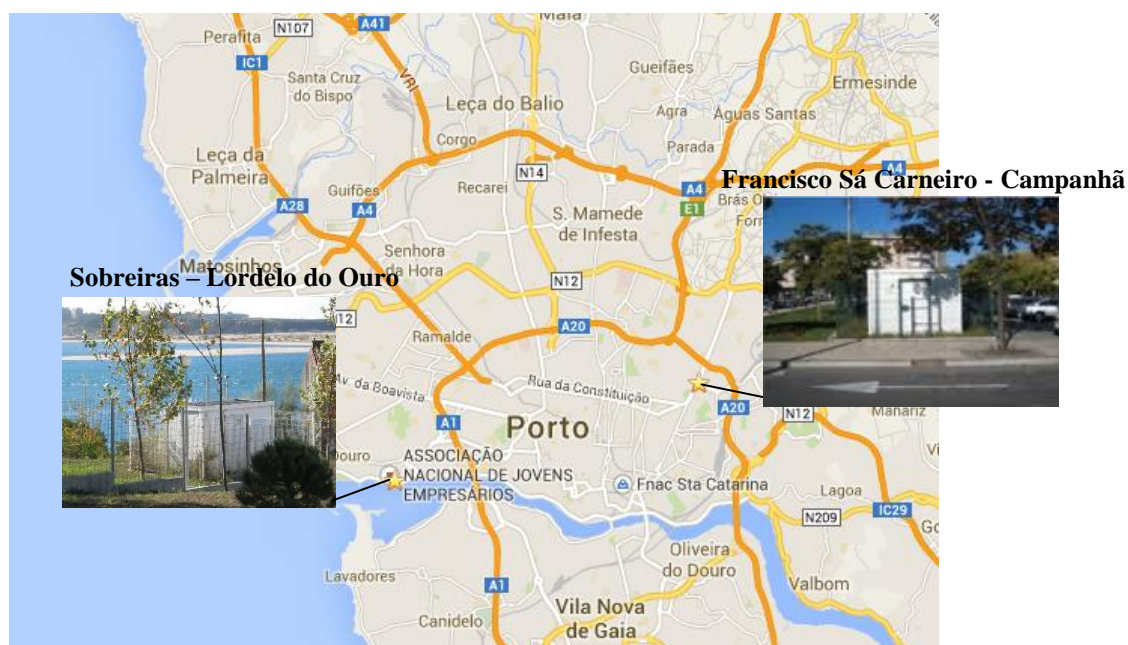


Figura 19 - Localização das estações de monitorização consideradas neste estudo, Francisco Sá Carneiro – Campanhã (41°09'52" -8°35'22") e Sobreiras - Lordelo do Ouro (41°08'51" -8°39'32").

As estações referidas estão caracterizadas na Tabela 10, em que está referida a sua designação, localização, tipo de ambiente e influência, o início de funcionamento e os poluentes que cada estação monitoriza.

Tabela 10 - Caracterização das estações monitorização de qualidade do ar da RMQA, do concelho do Porto.

Estação	Localização	Tipo de Ambiente	Tipo de Influência	Data de início de funcionamento	Poluentes
<b>Francisco Sá Carneiro (Campanhã -Antas)</b>	Praça Francisco Sá Carneiro, Campanhã	Urbano	Tráfego	Outubro 2000	CO, NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> e PM <sub>10</sub>
<b>Sobreiras – Lordelo do Ouro</b>	Rua Paulo da Gama, Foz do Douro	Urbano	Fundo	Dezembro 2007	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub> e O <sub>3</sub>

Relativamente às eficiências das estações de monitorização, a CCDR-N disponibiliza as eficiências de funcionamento obtidas em 2011, por analisador (Tabela 11). As eficiências inferiores a 85% encontram-se assinaladas a vermelho.

Tabela 11 - Eficiências por analisador, nas estações da RMQA-RN, em 2011.

Estação	Concelho	Analisadores					
		CO	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>		PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>
		(%8h)	(%8h)	Verão (%8h)	Inverno (%8h)	(% dia)	(% dia)
<b>Francisco Sá Carneiro</b>	<b>Porto</b>	95	98	100	96	76	--
<b>Sobreiras – Lordelo do Ouro</b>		100	100	100	100	97	97

Fonte: (CCDRN, 2012).

# Capítulo 5

## Análise dos Dados

### 5.1 Introdução

Neste capítulo será focada a análise da informação necessária para a construção do modelo de previsão, sendo fulcral o conhecimento dos fatores e variáveis que influenciam a qualidade do ar.

No desenvolvimento de um modelo de previsão é preciso ter em conta a informação disponível e o processamento dessa informação, de modo a que o resultado final seja um modelo de previsão robusto composto por variáveis independentes e relevantes que não apresentem co-linearidade entre si. Relativamente ao processo de escolha de variáveis que possam ter um papel importante na previsão da qualidade do ar, existe a preocupação em verificar esse mesmo papel de influência.

#### 5.1.1 Metodologia

- **Estações fixas de monitorização de qualidade do ar**

A metodologia seguida para análise dos dados provenientes das estações fixas de monitorização de qualidade do ar, consistiu em recolher e tratar os dados de concentrações dos poluentes atmosféricos  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ , NO,  $NO_2$ ,  $NO_x$ ,  $O_3$  e CO. Estes dados foram registados nas estações Francisco Sá Carneiro e Sobreiras-Lordelo do Ouro, no período de tempo de Abril de 2012 a Abril de 2014.

Relativamente ao tratamento de dados, todos os gráficos apresentados neste capítulo foram realizados recorrendo ao Microsoft Office Excel. Foi possível conhecer o comportamento evolutivo das concentrações dos poluentes ao longo do período em estudo, calcular as médias das concentrações diárias e criar histogramas de distribuição de frequências.

Esta investigação tem como base os dados de qualidade do ar disponibilizados pela CCDR-N, entre Abril de 2012 e Abril de 2014. Foram recolhidos os dados horários referentes aos poluentes  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , NO,  $NO_2$ ,  $NO_x$ ,  $O_3$  e CO. Os dados foram submetidos a análises estatísticas sendo calculadas as médias horárias e diárias, por poluente e por estação de monitorização.

## 5.2 Análise dos dados do CO

Os dados relativos ao monóxido de carbono foram registados na estação de monitorização de Francisco Sá Carneiro, entre Abril de 2012 e Abril de 2014. Através da Figura 20 é possível observar o comportamento das concentrações deste poluente durante o período em estudo.

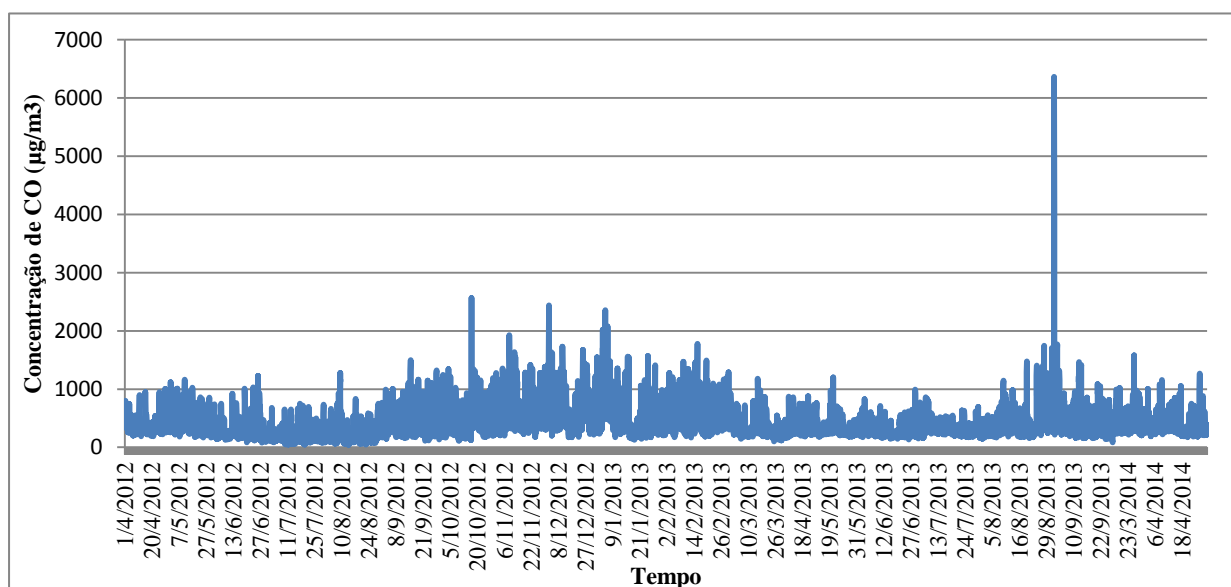


Figura 20 - Evolução da concentração de CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Francisco Sá Carneiro.

Através da observação do Figura 20 é possível verificar que as concentrações do CO são relativamente semelhantes durante o intervalo de tempo em estudo, com alguns picos inconstantes.

Denota-se uma anomalia dos dados entre Agosto e Setembro de 2013, com valores verificados excessivamente altos, que foram identificados e marcados para extração do conjunto de dados para construção dos modelos. Aliás, pela observação da Figura 21, um importante indicador da distribuição dos dados, verifica-se que nas classes da gama destes picos os casos registados desses níveis de concentrações são muito poucos, praticamente raros.

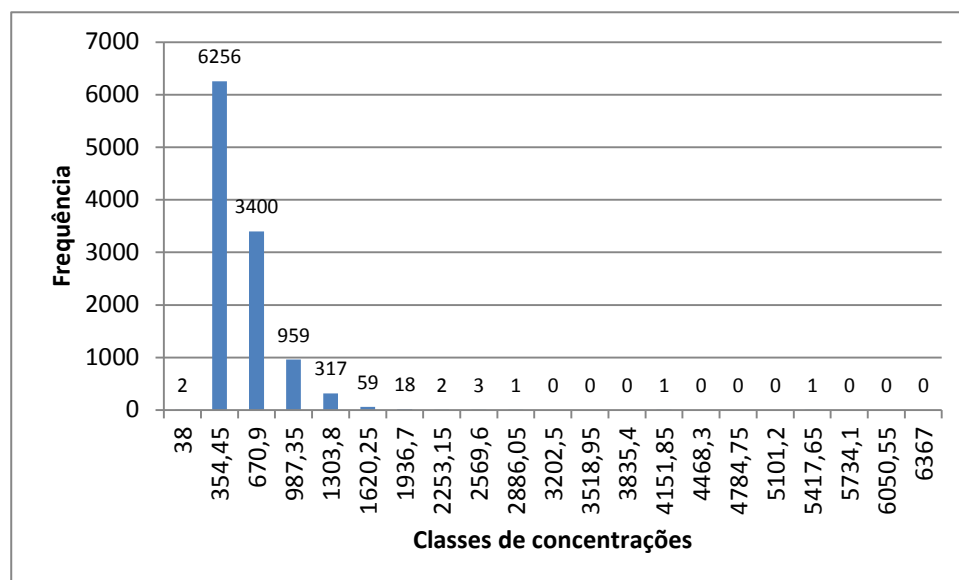


Figura 21 - Histograma da distribuição de frequências dos dados amostrais das concentrações de CO, registados na estação de Francisco Sá Carneiro, entre Abril de 2012 e Abril de 2014.

Relativamente ao perfil diário do CO, este demonstra um comportamento equilibrado, verificando-se alguns períodos de aumento de concentrações (6h-10h e 17h-20h), associados provavelmente ao fluxo automóvel. De salientar os altos níveis de concentrações registadas deste poluente (Figura 22).

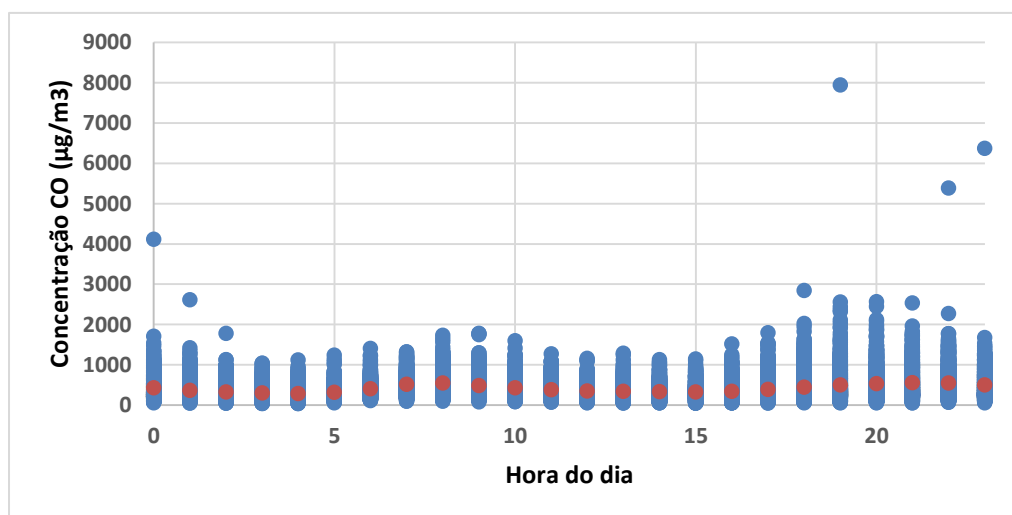


Figura 22 - Representação das concentrações horárias do CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), e médias das concentrações de CO por hora do dia, na estação de monitorização de Francisco Sá Carneiro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014).

### 5.3 Análise dos dados do NO

Em relação ao monóxido de azoto, os dados presentes nesta investigação provêm das duas estações de monitorização de qualidade do ar na cidade do Porto, Francisco Sá Carneiro e Sobreiras-Lordelo do Ouro. Pelas Figuras 23 e 24 é possível observar o comportamento das concentrações do NO, entre Abril de 2012 e Abril de 2014, nas duas estações de monitorização.

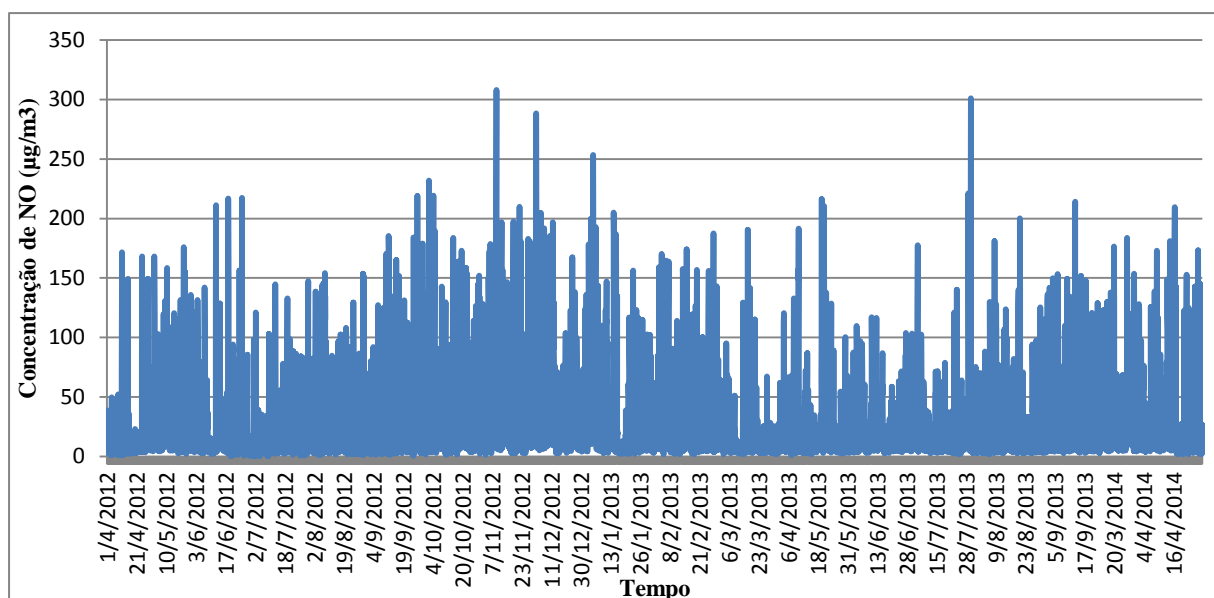


Figura 23 - Evolução da concentração do NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Francisco Sá Carneiro.

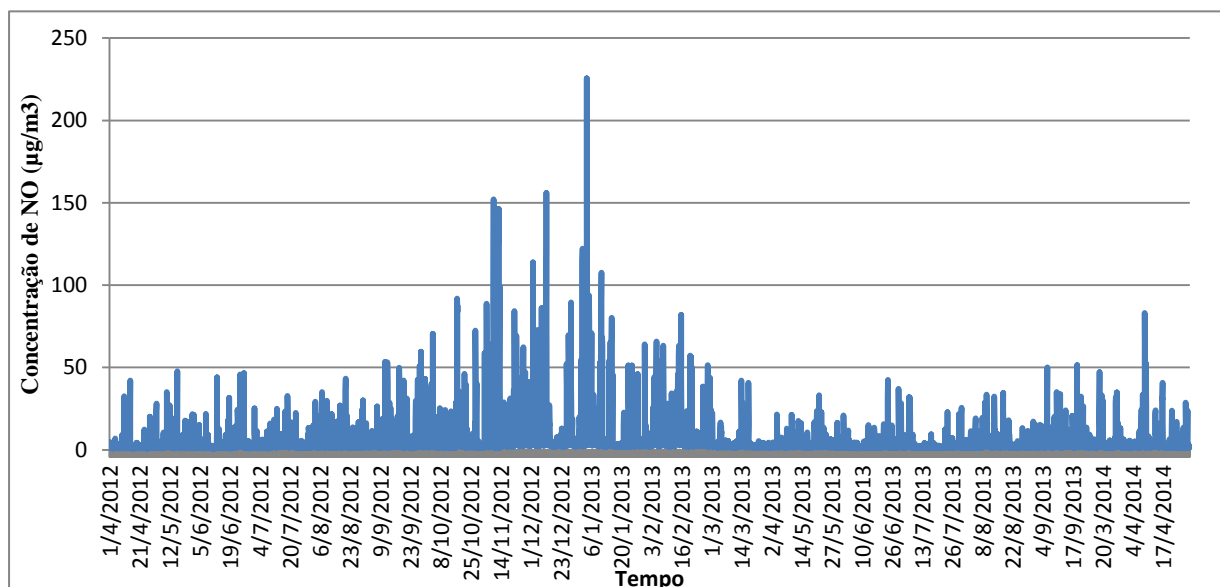


Figura 24 - Evolução da concentração do NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Sobreiras-Lordelo do Ouro.



Através da observação das Figuras 23 e 24, relativas ao poluente NO, podemos observar evoluções relativamente diferentes, com alguns picos de concentrações inexplicáveis e algumas diferenças no nível de concentrações médias do poluente nas duas estações. Este facto pode dever-se às características distintas do enquadramento geográfico das duas estações de monitorização, como uma maior ou menor taxa de movimento rodoviário ou maior ou menor desenvolvimento industrial.

Após observar a Figura 25, é possível concluir que os picos de concentrações inexplicáveis que foram observados nas Figuras 23 e 24 são casos isolados.

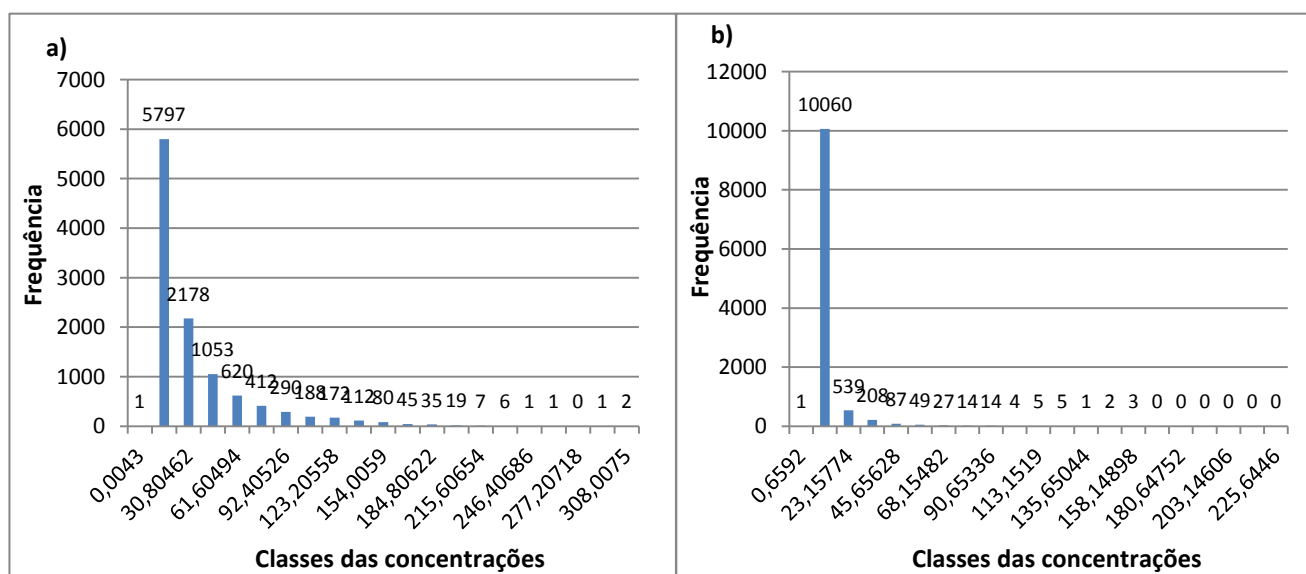


Figura 25 - Histograma da distribuição de frequências dos dados amostrais das concentrações de NO, registados na estação de Francisco Sá Carneiro (a) e Sobreiras Lordelo do Ouro (b), entre Abril de 2012 e Abril de 2014.

Relativamente ao perfil de variações diárias, o NO na estação de FSC, apresenta um perfil um pouco marcado por um pico de concentrações no início do dia, associado provavelmente às deslocações rodoviárias e início de atividade urbana (Figura 26).

Na estação de Sobreiras-Lordelo do Ouro, o perfil diário do NO é relativamente constante, apresentando poucas oscilações. De notar, que embora a sua variação seja relativamente baixa, apresenta níveis relativamente altos de concentrações, emitido geralmente por fontes industriais (Figura 27).

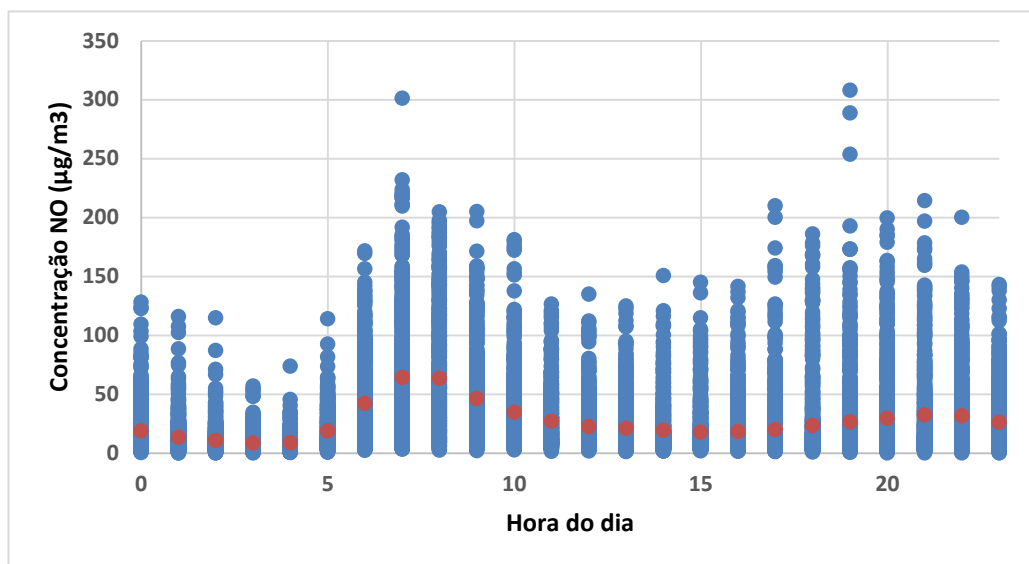


Figura 26 - Representação das concentrações horárias do NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), e médias das concentrações de NO por hora do dia, na estação de monitorização de Francisco Sá Carneiro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014).



Figura 27 - Representação das concentrações horárias do NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), e médias das concentrações de NO por hora do dia, na estação de monitorização de Sobreiras – Lordelo do Ouro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014).

## 5.4 Análise dos dados do NO<sub>2</sub>

Os dados do poluente dióxido de azoto foram registados em duas estações de monitorização, Francisco Sá Carneiro e Sobreiras–Lordelo do Ouro, entre Abril de 2012 e Abril de 2014. Através das Figuras 28 e 29 é possível observar o comportamento das concentrações deste poluente nas duas estações de monitorização.

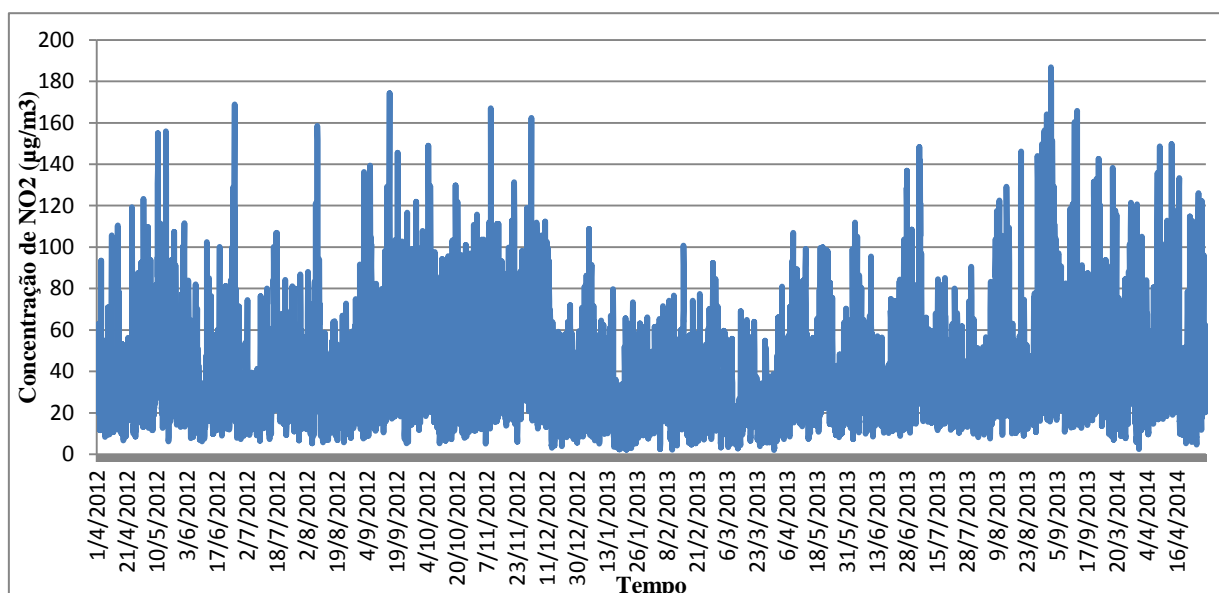


Figura 28 - Evolução da concentração de NO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Francisco Sá Carneiro.

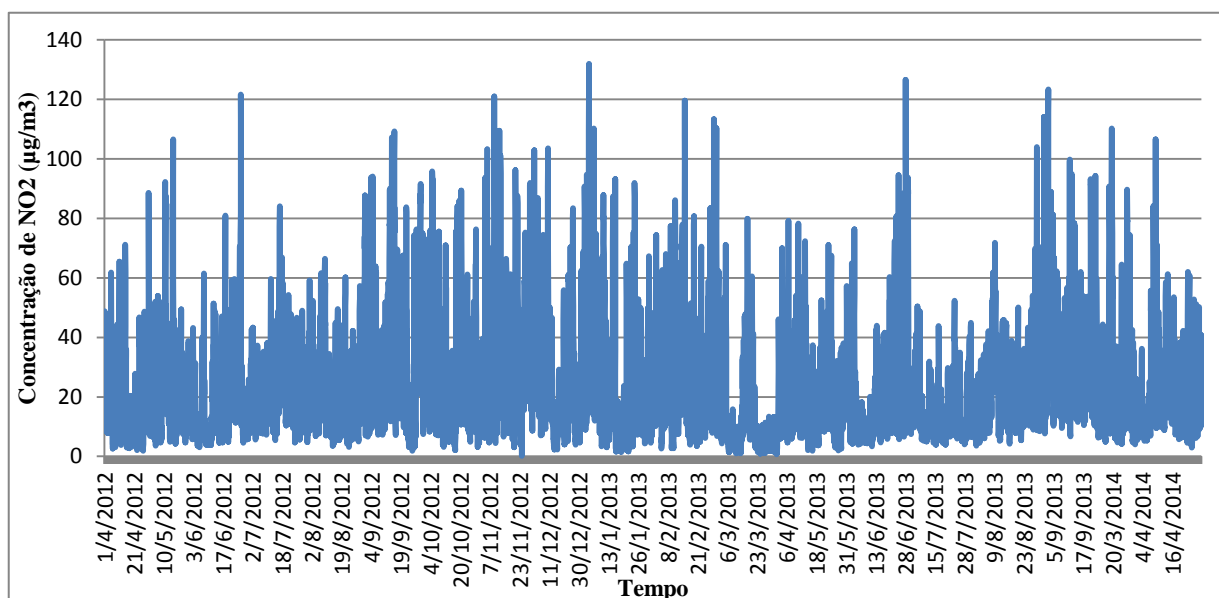


Figura 29 - Evolução da concentração de NO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Sobreiras – Lordelo do Ouro.

Pela observação das figuras relativas às concentrações do dióxido de azoto é possível observar padrões de evolução semelhantes nas duas estações, com vários picos de concentrações acentuados e níveis de emissões relativamente parecidos. Relativamente aos picos de concentrações sem razão aparente verificados na Figura 28, ao observar os valores descritivos das classes de concentrações do NO<sub>2</sub> na Figura 30 a) e b), podemos concluir que são poucos os casos registados com estes valores anómalos comparando com os números registados nas classes de concentrações mais frequentes.

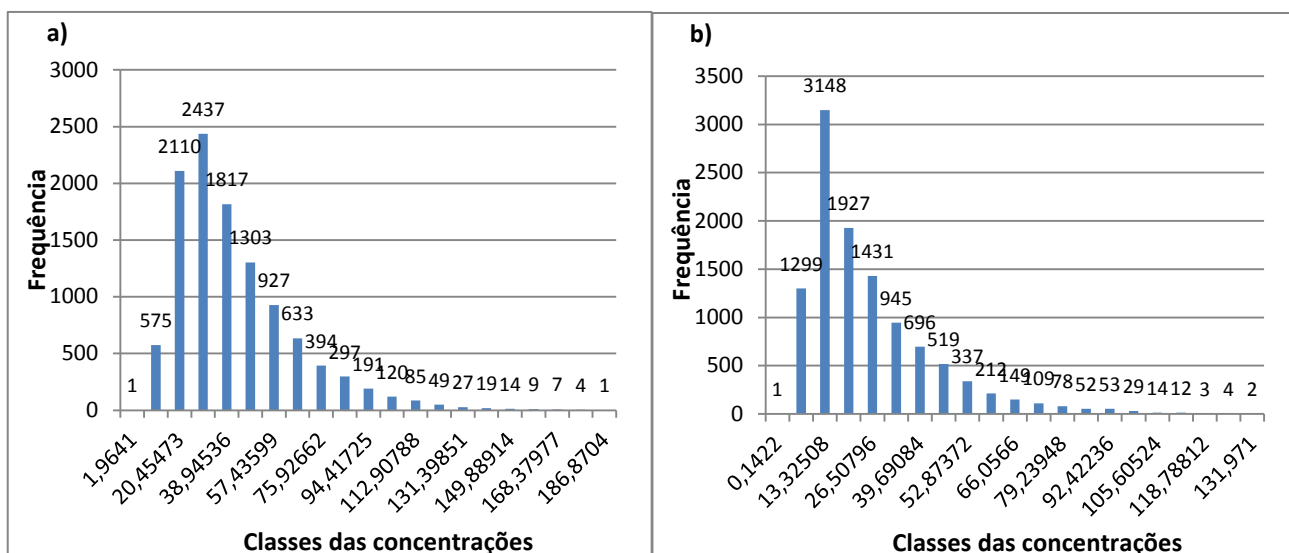


Figura 30 - Histograma da distribuição de frequências dos dados amostrais das concentrações de NO<sub>2</sub>, registados na estação de Francisco Sá Carneiro (a) e Sobreiras Lordelo do Ouro (b), entre Abril de 2012 e Abril de 2014.

No que diz respeito aos perfis diários do NO<sub>2</sub> apresentados nas Figuras 31 e 32, podemos observar que ambos os gráficos têm alterações de evolução de concentrações semelhantes ao longo do dia. Nos dois gráficos é possível observar oscilações das concentrações entre as 6h e as 10h e entre as 16h e as 21h, horários característicos dos períodos de maior afluência rodoviária na cidade.

Contudo, embora os gráficos das duas estações tenham oscilações nos mesmos períodos, o gráfico da estação de Sobreiras-Lordelo do Ouro apresenta um perfil mais suave, em comparação com o perfil horário mais acentuado da estação de Francisco Sá Carneiro. Esta conclusão vai de encontro a tipo de influência de ambas as estações.

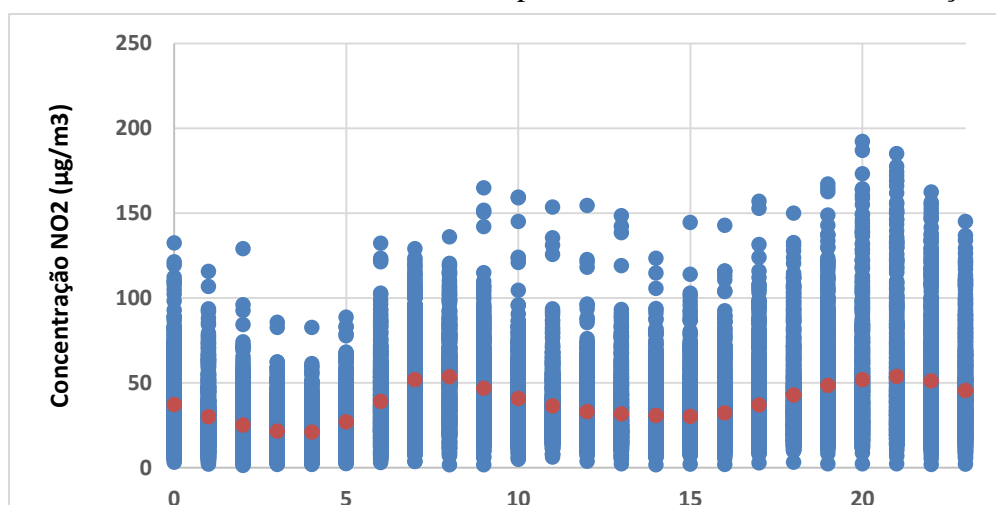


Figura 31 - Representação das concentrações horárias do NO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>), e médias das concentrações de NO<sub>2</sub> por hora do dia, na estação de monitorização de Francisco Sá Carneiro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014).

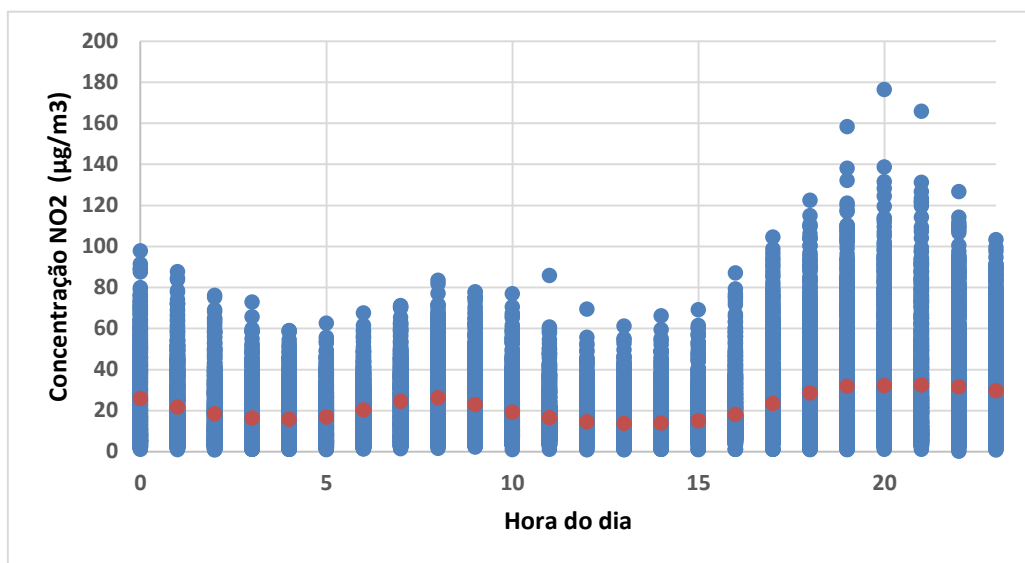


Figura 32 - Representação das concentrações horárias do NO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>), e médias das concentrações de NO<sub>2</sub> por hora do dia, na estação de monitorização de Sobreiras – Lordelo do Ouro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014).

Em relação ao NO<sub>2</sub>, a legislação nacional define um valor limite horário de 200 µg/m<sup>3</sup>, cujo número de excedências não deve ser ultrapassado 18 vezes por ano. Na Figura 33 estão representados os valores máximos horários, durante o período em estudo, com o valor do limite diário (VL NO<sub>2</sub>), o limiar superior de avaliação (LSA) e o limiar inferior de avaliação (LIA).

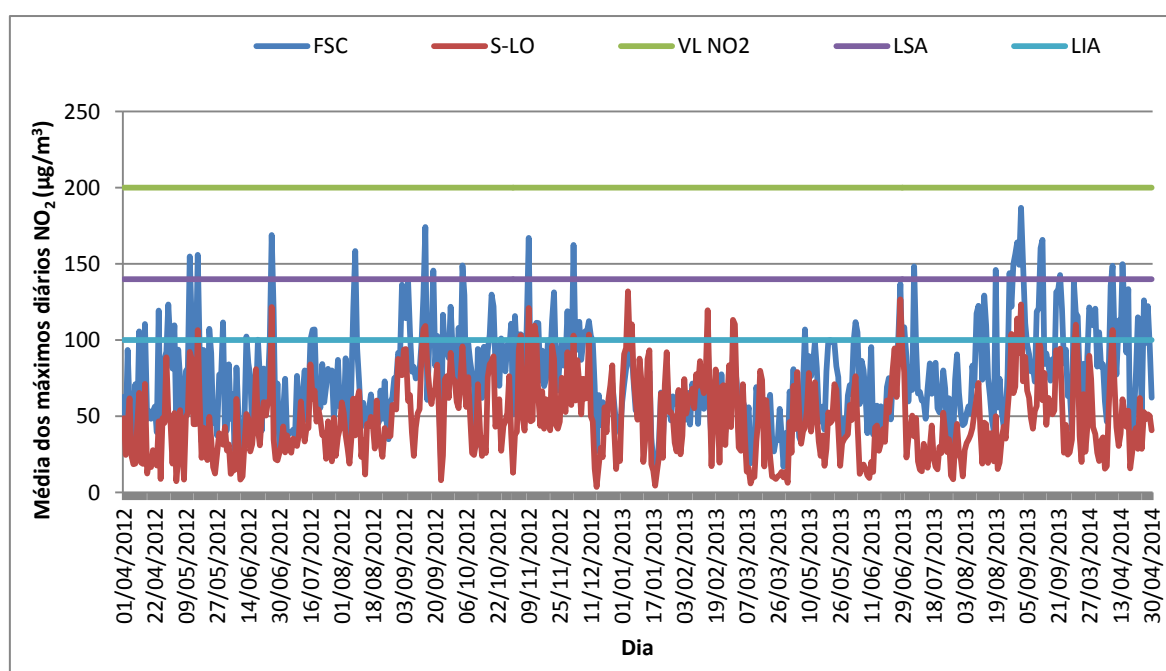


Figura 33 - Evolução das concentrações médias dos máximos horários estabelecidos para o NO<sub>2</sub>, registados entre 1 de Abril de 2012 e 31 de Abril de 2014, em relação ao limiar legal superior (LSA) e inferior (LIA) de avaliação, nas estações de monitorização FSC e S-LO.

Como se pode verificar pela Figura 33 não foram registados valores em que foi ultrapassado o valor limite legal do NO<sub>2</sub> nas duas estações de monitorização, contudo foram registadas ocorrências de ultrapassagens do LSA e LIA.

Em relação ao LSA, na estação de FSC foi atingido 9 vezes em 2012, 12 em 2013 e 2 em 2014, sendo que em S-LO foi atingido 10 vezes em 2012, 9 em 2013 e 2 em 2014. Quanto ao LIA, na estação de S-LO foram registadas 59 casos em que o limiar foi atingido em 2012, 32 casos em 2013 e 20 em 2014. Sendo importante referir novamente que o intervalo de tempo em estudo é de Abril de 2012 a Abril de 2014.

## 5.5 Análise dos dados do NO<sub>x</sub>

Relativamente aos óxidos de nitrogénio, os dados apresentados nesta investigação provém das duas estações de monitorização de qualidade do ar no Concelho do Porto, Francisco Sá Carneiro e Sobreiras-Lordelo do Ouro. Nas Figuras 34 e 35 podem ser observados os comportamentos das concentrações dos NO<sub>x</sub>, entre Abril de 2012 e Abril de 2014, nas duas estações de monitorização.

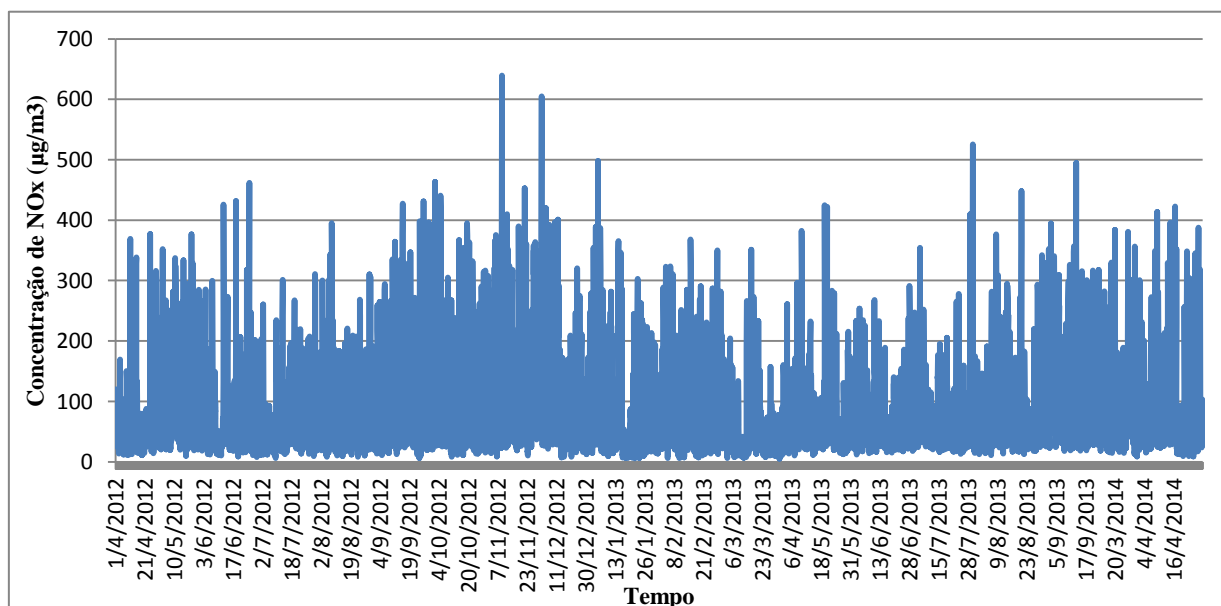
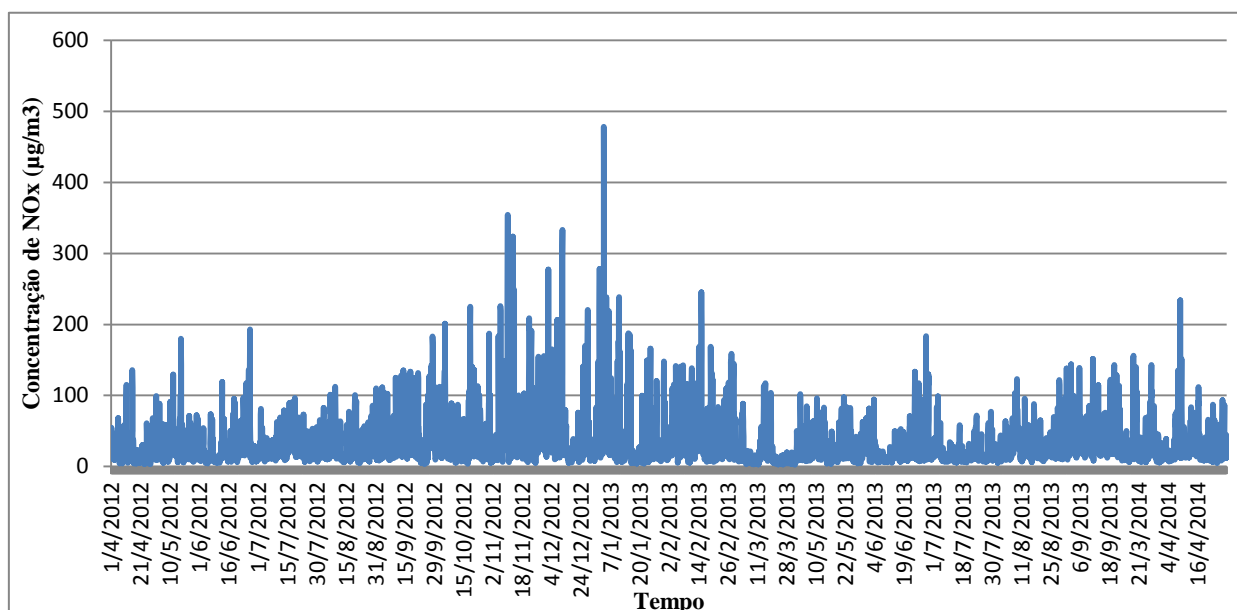


Figura 34 - Evolução da concentração de NO<sub>x</sub> (µg/m<sup>3</sup>), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Francisco Sá Carneiro.



Através da observação das Figuras 34 e 35 é possível verificar que existem algumas diferenças ao nível das emissões do poluente nas duas estações, isto é, na estação de Sobreiras–Lordelo do Ouro verificamos concentrações menores de NO<sub>x</sub> em comparação com as concentrações em Francisco Sá Carneiro. Como verificado na análise dos outros poluentes, continuam a verificar-se alguns picos inexplicáveis de concentrações, que analisando as classes de concentrações das Figuras 36a) e 36b) observamos que se tratam de casos isolados.

Relativamente ao perfil de variações diárias, o  $\text{NO}_x$  na estação de Francisco Sá Carneiro, apresenta um perfil marcado por um pico de concentrações no início do dia, associado provavelmente às deslocações rodoviárias e início de atividade urbana (Figura 37). Na estação de Sobreiras-Lordelo do Ouro, o perfil diário do  $\text{NO}_x$  é relativamente constante, apresentando poucas oscilações (Figura 38). Como seria de esperar, verifica-se um facto interessante, que os perfis diários de concentrações do  $\text{NO}_x$  são muito semelhantes com os perfis registados do  $\text{NO}$  e do  $\text{NO}_2$ .

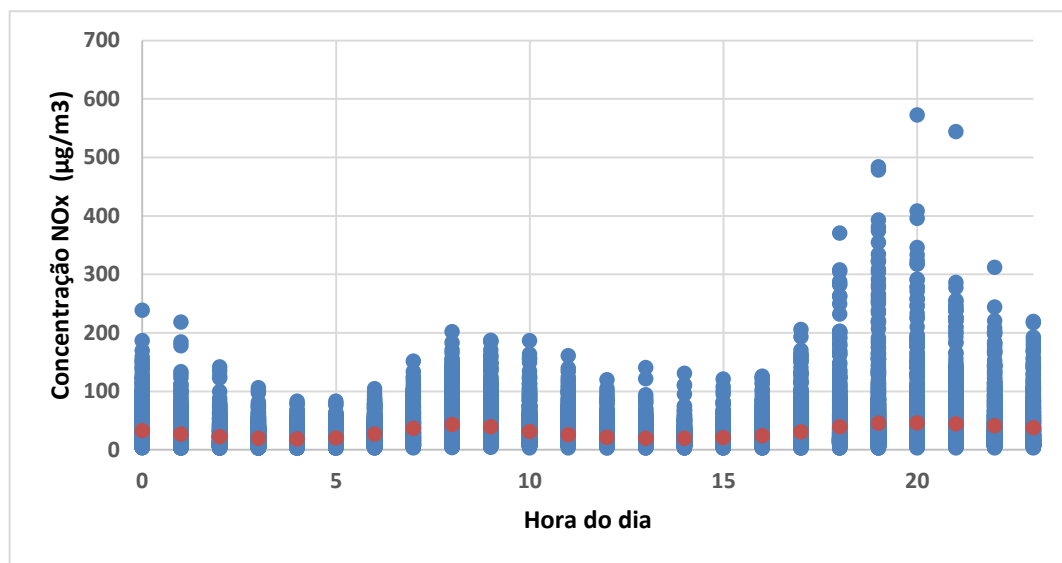


Figura 37 - Representação das concentrações horárias do  $\text{NO}_x$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), e médias das concentrações de  $\text{NO}_x$  por hora do dia, na estação de monitorização de Francisco Sá Carneiro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014).

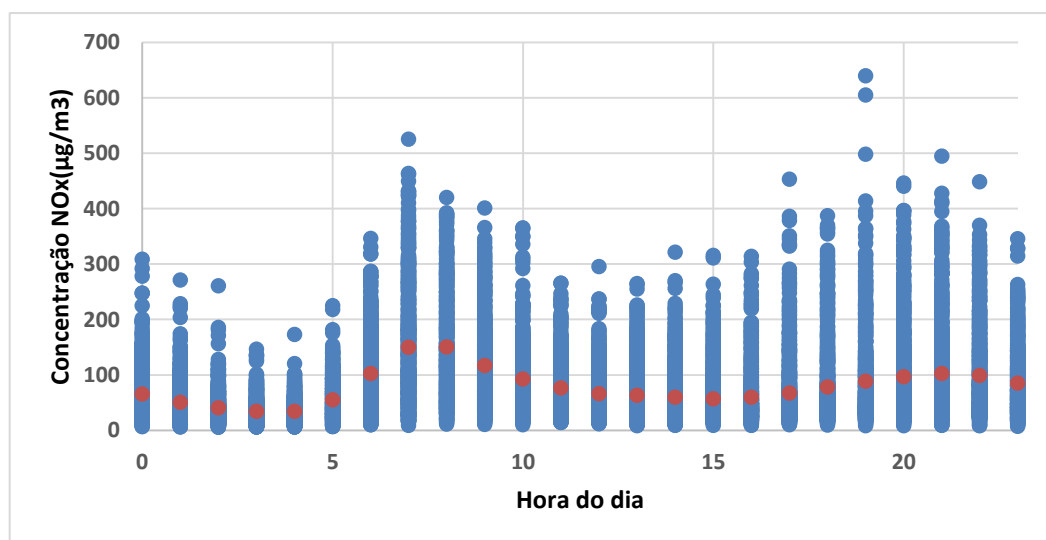


Figura 38 - Representação das concentrações horárias do  $\text{NO}_x$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), e médias das concentrações de  $\text{NO}_x$  por hora do dia, na estação de monitorização de Sobreiras – Lordelo do Ouro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014).



## 5.6 Análise dos dados das PM<sub>10</sub>

Em relação às partículas de diâmetro até 10µm, os dados apresentados nesta investigação provém das duas estações de monitorização de qualidade do ar na cidade do Porto. Nas Figuras 39 e 40 estão constatados os comportamentos das concentrações das PM<sub>10</sub>, entre Abril de 2012 e Abril de 2014, nas duas estações de monitorização.

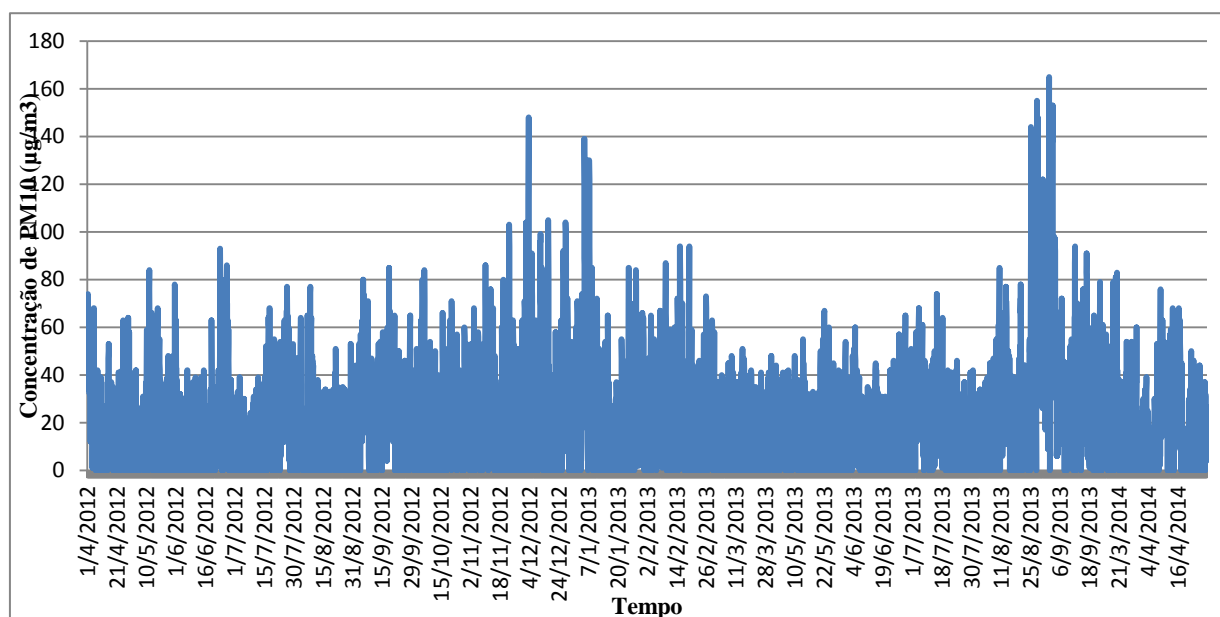


Figura 39 - Evolução da concentração de PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Francisco Sá Carneiro.

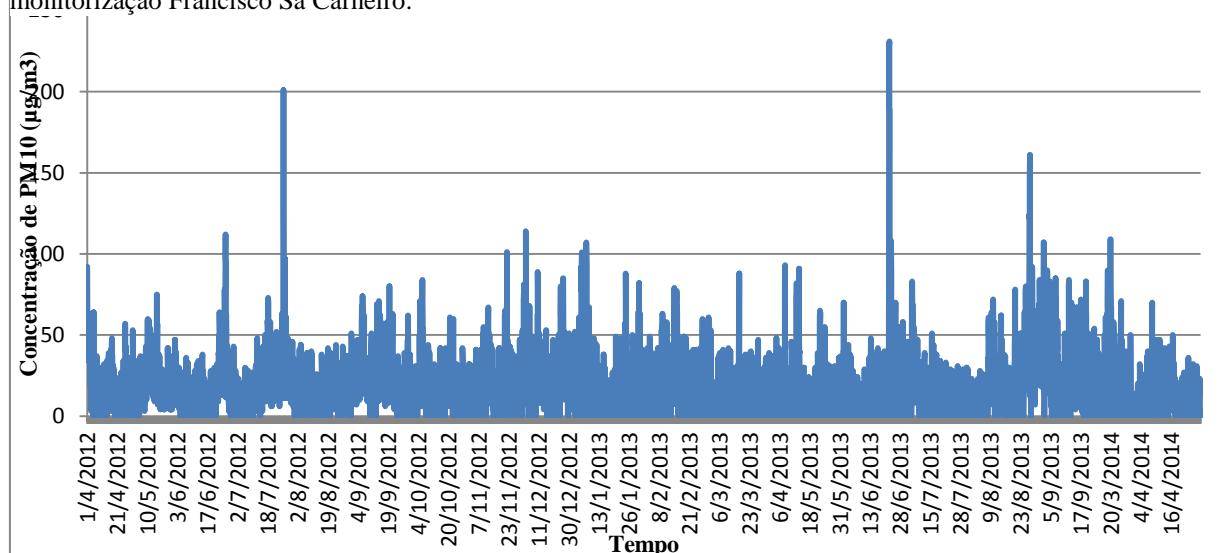


Figura 40 - Evolução da concentração de PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Sobreiras – Lordelo do Ouro.

Ao observar as Figuras 39 e 40 relativas às concentrações de  $PM_{10}$  pode ser observado que existe uma diferença em termos de emissões, em que na estação de Sobreiras – Lordelo do Ouro são verificados níveis superiores de concentrações.

Em ambos os gráficos estão presentes alguns picos de concentrações, em que as anomalias identificadas foram extraídas para o tratamento de dados necessário à elaboração dos modelos de previsão, uma vez que como se pode verificar na Figura 41 os casos registados de concentrações excessivamente altas e isoladas, são casos raros comparativamente com classes de valores mais frequentemente registados.

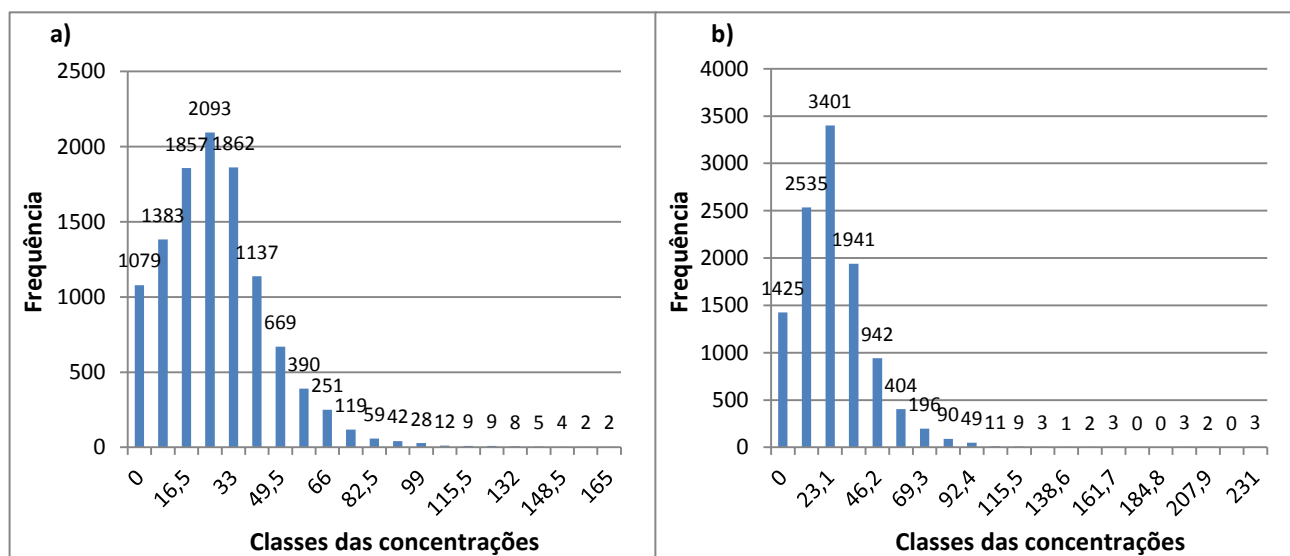


Figura 41 - Histograma da distribuição de frequências dos dados amostrais das concentrações de  $PM_{10}$ , registados na estação de Francisco Sá Carneiro (a) e Sobreiras Lordelo do Ouro (b), entre Abril de 2012 e Abril de 2014.

A estação de Francisco Sá Carneiro apresenta um perfil diário de tráfego, de acordo com a sua classificação. Verifica-se uma variação diária acentuada dos valores das concentrações de  $PM_{10}$ , em se destacam alguns picos de atividade: 7h-10h, 15h-16h e 19h-21h. Esta atividade está provavelmente relacionada com uso de transportes (Figura 42).

Relativamente à estação de Sobreiras-Lordelo do Ouro, a variação diária dos valores de  $PM_{10}$  apresenta um perfil diário de fundo urbano, tal como a sua classificação, com uma variação diária suave. Contudo, o perfil diário de  $PM_{10}$  revela a presença de outras possíveis fontes emissoras de partículas, que não as de tráfego, responsáveis pelos valores elevados verificados durante o período noturno. E os valores mais baixos de  $PM_{10}$  observados durante o dia podem ser justificados pela maior dispersão de poluentes que ocorre durante o período diurno (Figura 43).

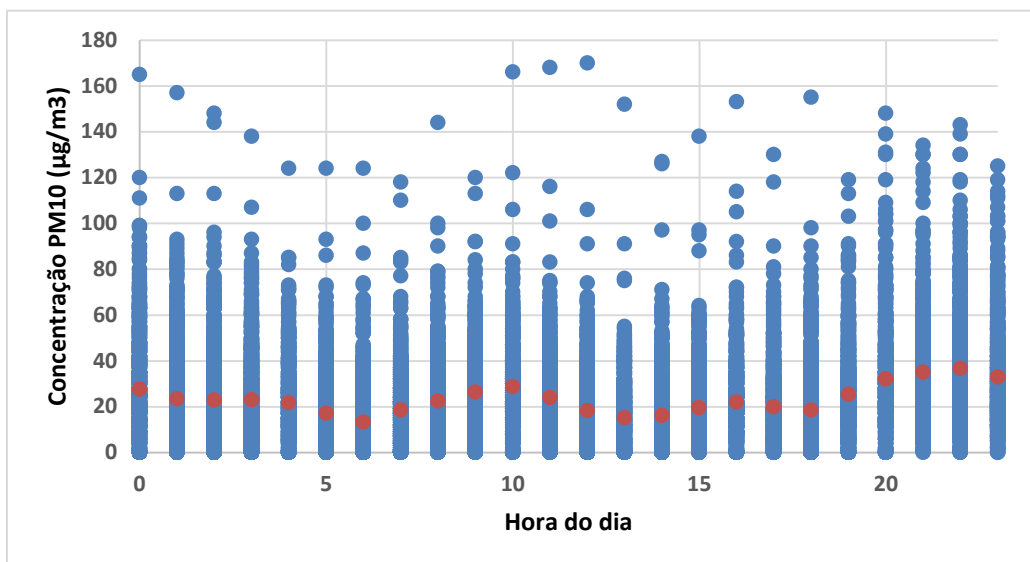


Figura 42 - Representação das concentrações horárias do PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>), e médias das concentrações de PM<sub>10</sub> por hora do dia, na estação de monitorização de Francisco Sá Carneiro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014).

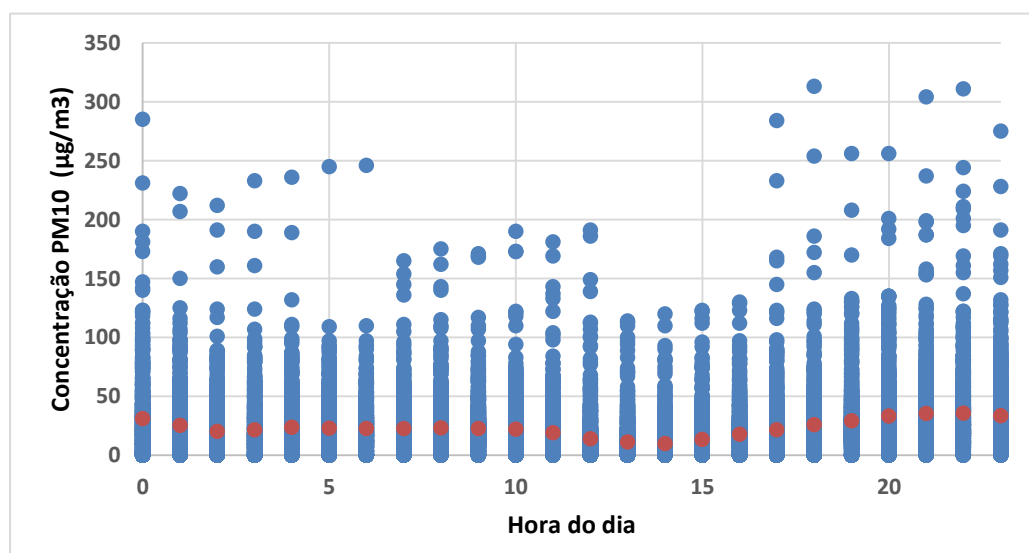


Figura 43 - Representação das concentrações horárias do PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>), e médias das concentrações de PM<sub>10</sub> por hora do dia, na estação de monitorização de Sobreiras – Lordelo do Ouro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014).

Relativamente às PM<sub>10</sub> foi estabelecido pela legislação nacional um valor limite diário (50 µg/m<sup>3</sup>), que não deve exceder mais de 35 casos por ano. Na Figura 44 estão representados os valores máximos diários, durante o período em estudo, com o valor do limite diário apresentado (VL PM<sub>10</sub>).

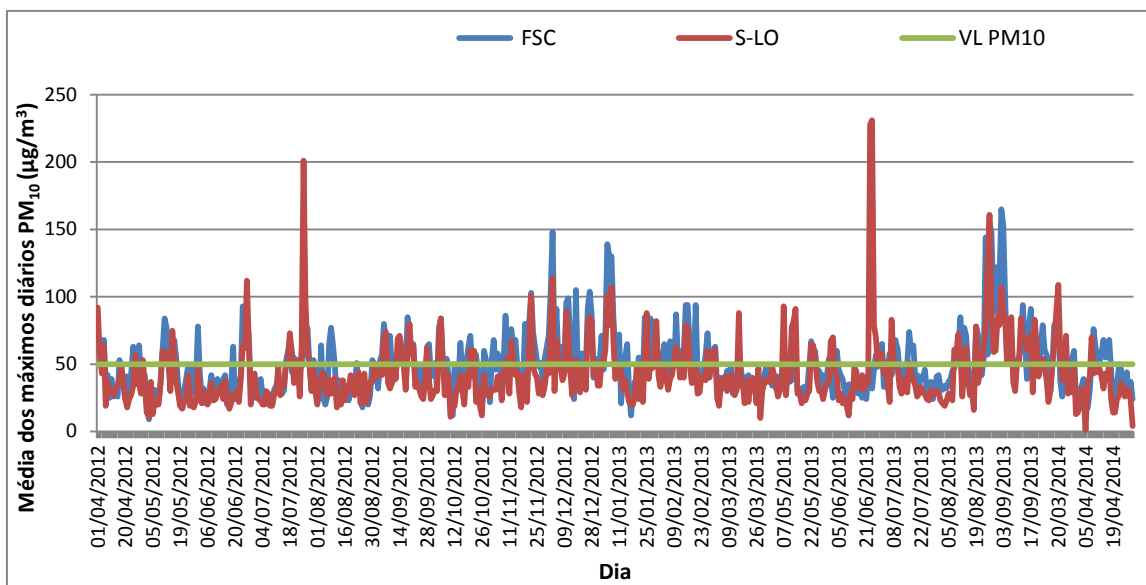


Figura 44 - Evolução das concentrações médias dos máximos diários estabelecidos para as PM<sub>10</sub>, registados entre 1 de Abril de 2012 e 31 de Abril de 2014, em relação ao valor limite legal, nas estações de monitorização FSC e S-LO.

Ao analisar a Figura 44 verificamos que foi ultrapassado o valor limite legal em todo o período temporal analisado e em ambas as estações de monitorização. Relativamente ao número de excedências por dia, em 2012 foram registadas 99 excedências em FSC e 55 excedências em S-LO, enquanto que em 2013 foram registadas 96 excedências em FSC e 68 em S-LO. Uma vez que o número de excedências deverá ser menor ou igual a 35 dias por ano.

## 5.7 Análise dos dados das PM<sub>2,5</sub>

Relativamente às partículas de diâmetro até 2,5µm, os dados apresentados nesta investigação provém da estação de monitorização de qualidade do ar de Sobreiras–Lordelo do Ouro. Na Figura 47 está retratado o comportamento da concentração das PM<sub>2,5</sub>, entre Abril de 2012 e Abril de 2014.

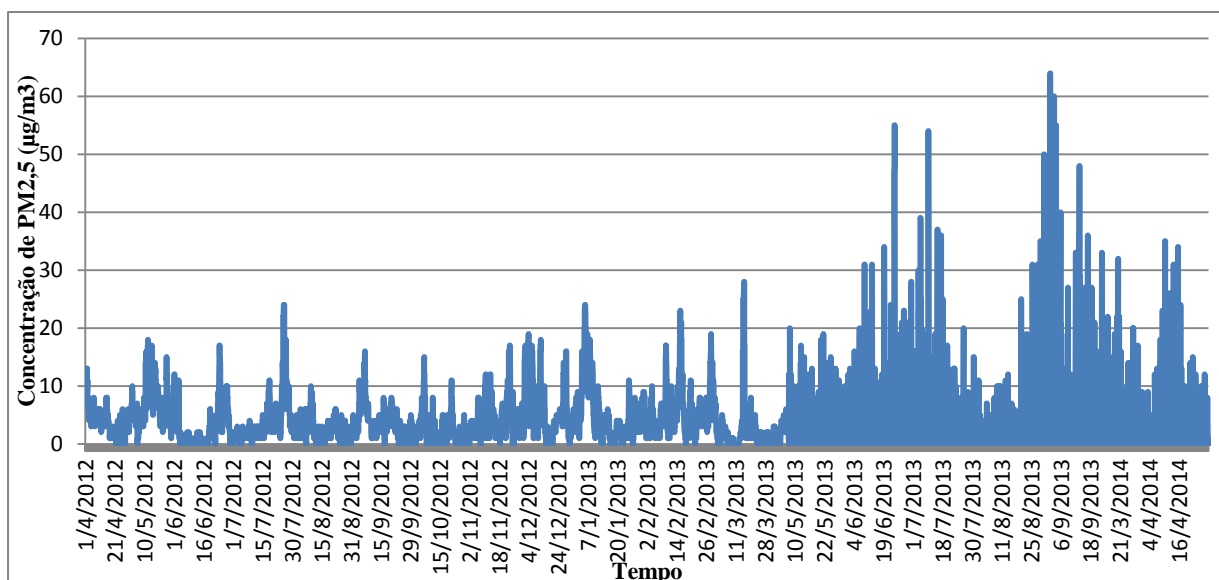


Figura 45 - Evolução da concentração de PM<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup>), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Sobreiras – Lordelo do Ouro.

Na Figura 45 relativa às emissões de PM<sub>2,5</sub> é observado um padrão de comportamento das concentrações desde Abril de 2012 a Abril de 2014, sensivelmente, e de seguida é verificado um nível de emissões um pouco superior. Analisando as classes de concentrações do histograma apresentado na Figura 46, é possível observar exatamente a frequência das concentrações registadas, sendo fácil a identificação dos casos em que se registaram concentrações superiores de PM<sub>2,5</sub>.

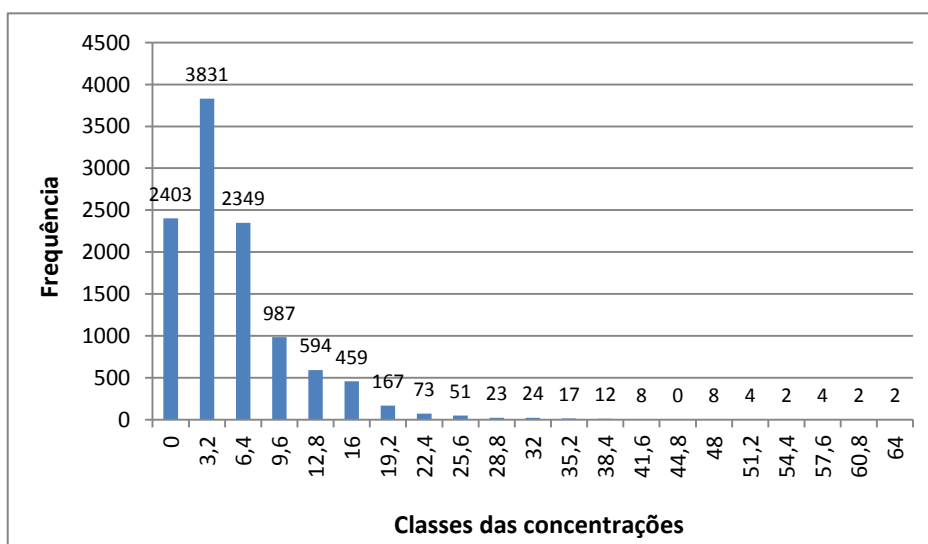


Figura 46 - Histograma da distribuição de frequências dos dados amostrais das concentrações de PM<sub>2,5</sub>, registados na estação Sobreiras Lordelo do Ouro, entre Abril de 2012 e Abril de 2014.

Relativamente às PM<sub>2,5</sub>, o seu perfil diário está de acordo com a classificação da estação de Sobreiras-Lordelo do Ouro, como estação de fundo. A variação diária de PM<sub>2,5</sub> é extremamente subtil, com muito poucas oscilações (Figura 47).

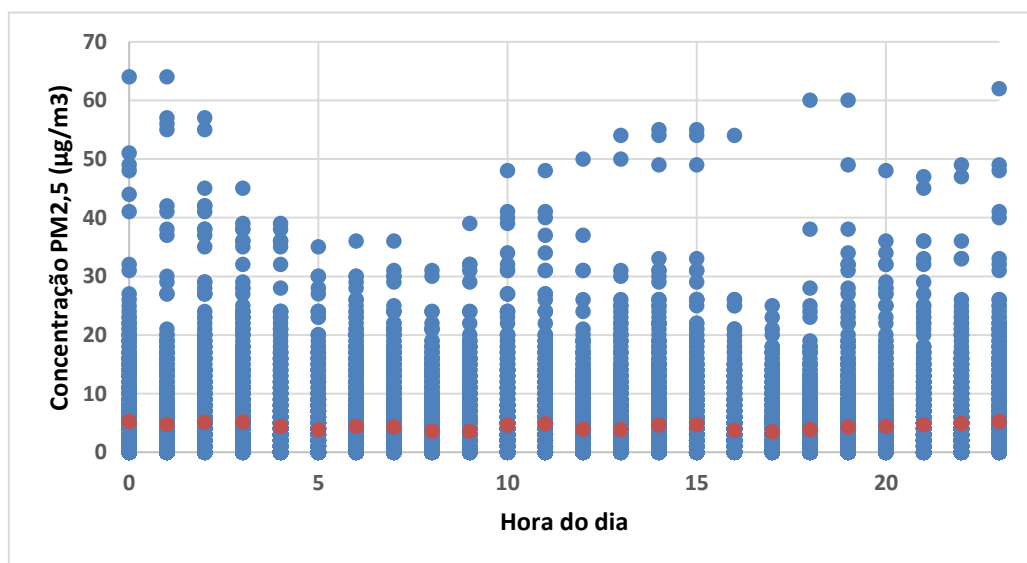


Figura 47 - Representação das concentrações horárias do PM<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup>), e médias das concentrações de PM<sub>2,5</sub> por hora do dia, na estação de monitorização de Sobreiras – Lordelo do Ouro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014).

## 5.8 Análise dos dados do O<sub>3</sub>

Em relação às emissões de ozono, os dados presentes nesta investigação provêm da estação de monitorização de qualidade do ar de Sobreiras–Lordelo do Ouro. Na Figura 48 apresenta-se o comportamento da concentração de O<sub>3</sub>, entre Abril de 2012 e Abril de 2014.

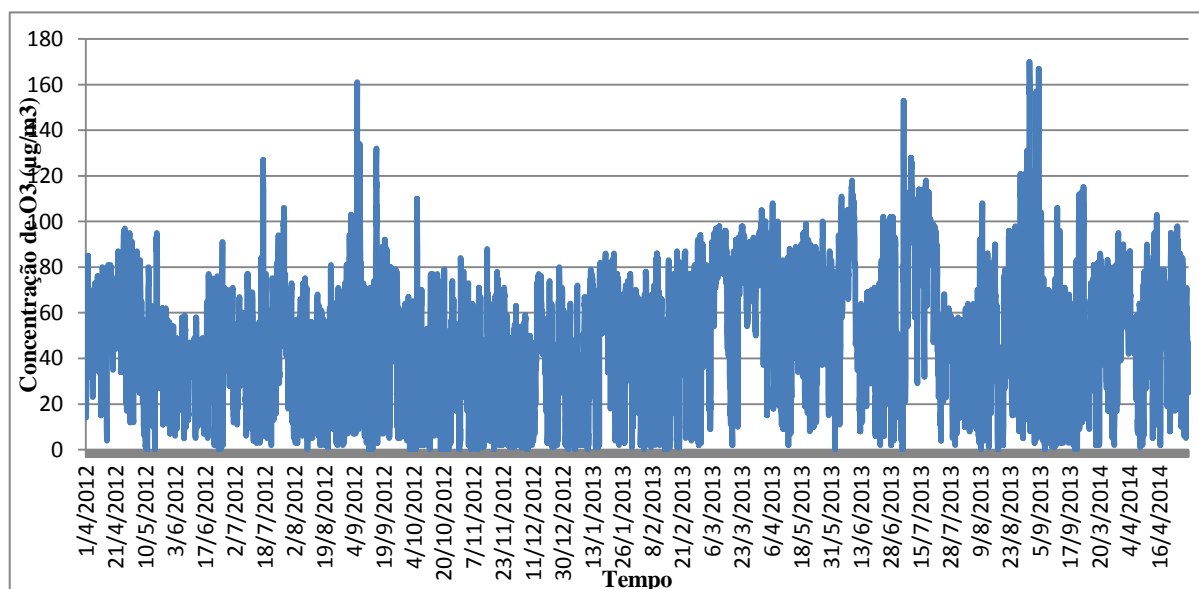


Figura 48 - Evolução da concentração de O<sub>3</sub> (µg/m<sup>3</sup>), desde Abril de 2012 a Abril de 2014, na estação de monitorização Sobreiras – Lordelo do Ouro.

Ao observar a Figura 48 relativa às concentrações de O<sub>3</sub> pode ser observado um padrão um pouco inconstante das concentrações de ozono, com alguns picos de emissão irregulares, em que as anomalias detetadas foram excluídas para o tratamento de dados

na construção dos modelos de previsão. Este padrão pode também ser observado na Figura 49, em que estão representadas as classes de concentrações registadas do ozono.

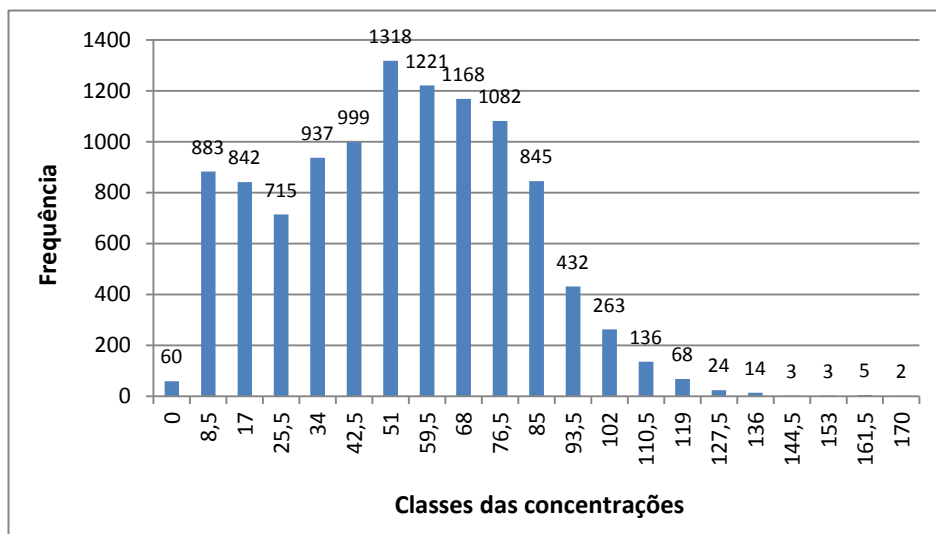


Figura 49 - Histograma da distribuição de frequências dos dados amostrais das concentrações do O<sub>3</sub>, registados na estação Sobreiras Lordelo do Ouro, entre Abril de 2012 e Abril de 2014.

O O<sub>3</sub> como poluente fotoquímico, é geralmente formado durante o dia e consumido à noite (Monteiro,2002). Através da Figura 50 podemos constatar este fato, verificando um aumento das concentrações de O<sub>3</sub> durante o período de atividade diurna (9h-18h), sugerindo a atividade de transportes rodoviários percursos de O<sub>3</sub>. Relativamente às concentrações ligeiramente mais baixas durante a noite, pode ser uma indicação de um provável consumo do O<sub>3</sub> pelo NO emitido por fontes industriais.

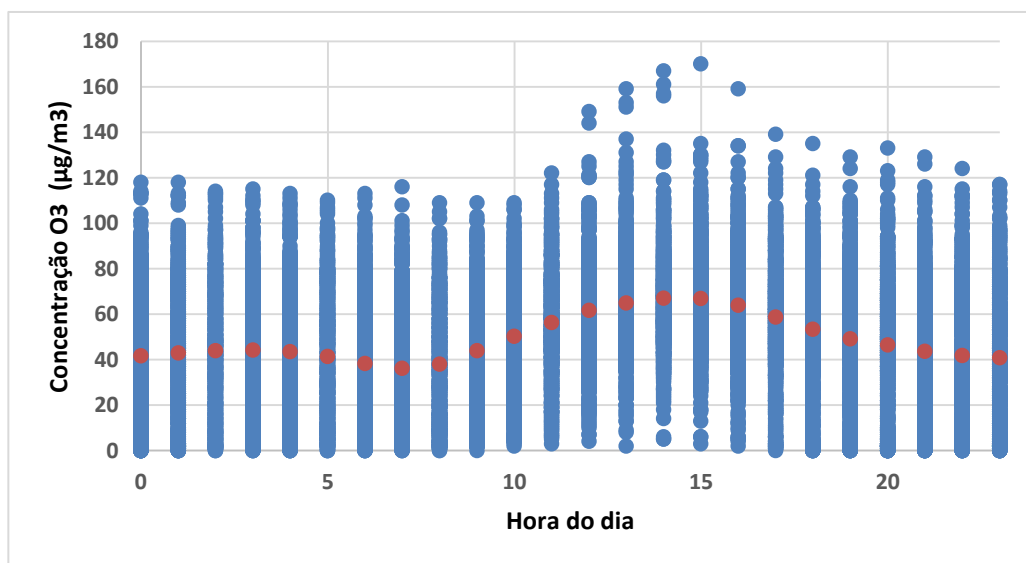


Figura 50 - Representação das concentrações horárias do O<sub>3</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), e médias das concentrações de O<sub>3</sub> por hora do dia, na estação de monitorização de Sobreiras – Lordelo do Ouro (dados de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014).

# **Capítulo 6**

## **Modelos de Previsão**

### **6.1 Introdução**

Terminado o estudo das variáveis que influenciam a qualidade do ar, inicia-se o processo de construção do modelo de previsão. Neste capítulo, é possível observar uma análise detalhada do processo de construção dos vários modelos de previsão de que foram realizados ao longo deste trabalho. Adicionalmente apresentam-se os resultados dos testes efetuados com observações acerca dos mesmos.

O objetivo desta secção é a obtenção de modelos de implementação simples, de funcionamento fluido e que tenham a capacidade de produzir resultados o mais fiáveis possível. Sendo necessário conhecer a amplitude do histórico a utilizar, isto é, saber quantos dias são necessários de informação para treino da rede neuronal e identificar as variáveis a aplicar.

### **6.2 Processo da Metodologia**

Neste subcapítulo irá ser descrita a metodologia utilizada em todos os passos do processo escolhido para a previsão.

Depois de reunidos todos os dados necessários para o desenvolvimento deste processo, iniciou-se o trabalho através do tratamento das variáveis, de modo a colocar todos os dados registados por apresentação horária, mensal e anual.

Posteriormente foi utilizado o programa de cálculo Microsoft Office Excel, para criar gráficos em que fosse possível observar a evolução das variáveis e analisar os vários comportamentos dos diferentes poluentes, em função das variáveis em estudo.



A obtenção dos resultados foi possível através da criação de redes neuronais, recorrendo à utilização do *software* MatLab. Foi escolhido este *software* pela sua flexibilidade e grau de aplicação simples (Ghazali, 2012). As redes neuronais foram criadas utilizando o algoritmo de retro propagação de Levenberg-Marquardt.

A metodologia envolve a utilização de dois conjuntos de dados, um de treino da rede neuronal e outro de teste, para verificar a eficiência e exatidão do desenvolvimento dos modelos.

### 6.3 Avaliação dos Modelos

A ferramenta utilizada no MatLab exige algumas considerações. Ao criar sucessivamente redes neuronais, mesmo com os mesmos dados de entrada, os resultados obtidos são sempre diferentes. Este fato é devido às características aleatórias deste programa: ambos os pesos iniciais dos neurónios e o conjunto de teste interno do MatLab são escolhidos aleatoriamente no início de cada treino.

Deste modo, para a obtenção de resultados fiáveis, utilizou-se uma técnica comum na área das RNAs, designada de *ensemble averaging*. Esta técnica consiste em criar várias redes neuronais e combinar essas mesmas redes, de modo a resultar um único modelo. Normalmente, esta prática tem uma performance superior do que os modelos individuais, uma vez que os erros dos modelos individuais tendem a diminuir.

A forma mais simples de avaliar os resultados dos modelos de previsão consiste na observação de gráficos com os valores reais da variável dependente e os seus valores previstos, no período em estudo. Contudo, existem um conjunto de ferramentas que permite avaliar modelos de previsão, de modo a determinar a qualidade dos mesmos.

Durante a investigação inerente à criação do modelo de previsão de qualidade do ar, foi utilizada como medida de erro o MAPE (*Mean absolute percentage error*) (eq. 6.1):

$$MAPE_k = \frac{\frac{1}{N} \sum |e_{t+k|t}|}{Y_{med}} \times 100 \quad (6.1)$$

Em que  $Y_{med}$  representa o valor médio para o conjunto de dados a tratar.

$$e_{d+k|d} = Y_{d+k} - \hat{Y}_{d+k|d} \quad (6.2)$$

Em que  $Y_{d+k}$  corresponde ao valor real e  $\hat{Y}_{d+k|d}$  corresponde ao valor previsto.

A ferramenta proposta é considerada uma boa forma de verificar a qualidade do modelo de previsão, sendo que os resultados exibidos em percentagem proporcionam uma fácil interpretação, comparativamente com outros métodos de medição de erro. De seguida, apresenta-se passo por passo (Tabelas 12 e 13), a metodologia utilizada para a obtenção do erro MAPE de um exemplo de modelo.

Tabela 12 - Passo 1 - Aquisição das 5 previsões individuais para obtenção do modelo ensemble.

Hora	Previsão 1	Previsão 2	Previsão 3	Previsão 4	Previsão 5	Essemble
00:00	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6 = \text{Média} (X_1, X_5)$
01:00	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6 = \text{Média} (Y_1, Y_5)$
02:00	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6 = \text{Média} (Z_1, Z_5)$
...	...	...	...	...	...	...

Tabela 13 - Passo 2 – Cálculo do erro de cada modelo individual para obtenção do erro *ensemble*.

Hora	Previsão 1	Previsão 2	Previsão 3	Previsão 4	Previsão 5	Essemble
00:00	$A_1 = (Conc_{h=0} - X_1)$	$A_2 = (Conc_{h=0} - X_2)$	$A_3 = (Conc_{h=0} - X_3)$	$A_4 = (Conc_{h=0} - X_4)$	$A_5 = (Conc_{h=0} - X_5)$	$A_6 = \text{Média} (A_1, A_5)$
01:00	$B_1 = (Conc_{h=1} - Y_1)$	$B_2 = (Conc_{h=1} - Y_2)$	$B_3 = (Conc_{h=1} - Y_3)$	$B_4 = (Conc_{h=1} - Y_4)$	$B_5 = (Conc_{h=1} - Y_5)$	$B_6 = \text{Média} (B_1, B_5)$
02:00	$C_1 = (Conc_{h=2} - Z_1)$	$C_2 = (Conc_{h=2} - Z_2)$	$C_3 = (Conc_{h=2} - Z_3)$	$C_4 = (Conc_{h=2} - Z_4)$	$C_5 = (Conc_{h=2} - Z_5)$	$C_6 = \text{Média} (C_1, C_5)$
...	...	...	...	...	...	...

Em que *Conc.* corresponde à concentração registada do poluente para o qual se está a testar a rede neuronal, na hora em que essa concentração se verificou. Sendo que a previsão individual de cada poluente no passo 2 (Tabela 13) corresponde à concentração real registada do poluente menos o resultado da previsão, para o mesmo instante.

## 6.4 Descrição do Modelo

Para a previsão das concentrações dos poluentes foram experimentados diferentes modelos, através da inserção de diferentes variáveis.

Com base no estado da arte desenvolvido no capítulo 2, foi feito um levantamento dos fatores que têm de alguma forma influência sobre a qualidade do ar exterior. Resultando na implementação de uma série de variáveis de carácter meteorológico, nos modelos desenvolvidos nesta investigação. Os dados relativos a estas variáveis foram registados no período de 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014 e correspondem às variáveis velocidade e direção do vento, radiação, temperatura, nuvens e pluviosidade.

Além destas variáveis, existem outras que apresentam alguma influência sobre a qualidade das previsões, conferindo sazonalidade ou pequenas variações semanais e diárias, como é o caso das variáveis que representam os dias da semana e horas.

A estratégia adotada na construção dos modelos, foi de começar por testar o conjunto de todas as variáveis (hora, dia da semana, velocidade do vento, direção do vento, radiação, temperatura, nuvens e pluviosidade) (Modelo 1) e de seguida retirar uma variável de cada vez (Modelo 2 a Modelo 9). Consoante os resultados obtidos, combinavam-se as variáveis com melhores resultados, criando novos modelos na expectativa de encontrar o modelo com menor erro possível, ou seja, aquele que prevê mais fielmente as oscilações do poluente.

Ao melhor modelo de cada poluente foi ainda acrescentada a variável D-1. A utilização desta variável pretende introduzir nos modelos já construídos o fator persistência das concentrações. Este método foi aplicado a cada um dos poluentes.

### 6.4.1 Quadro temporal da previsão e caracterização dos dados

O quadro temporal de previsão presente nesta investigação, é explicado e ilustrado de seguida, na Figura 51.

A previsão das concentrações dos poluentes é realizada para cada uma das 24 horas de dia (D). A execução da previsão é realizada diariamente às 24:00h ( $t = 0$ ), para o dia D. No momento da previsão  $t_0$ , os dados das concentrações para as 24 horas do dia (D-1) são conhecidas, e são utilizadas como dados de *input* para a previsão. O dia da semana

$s_{(D)}$  e a hora  $h$ , para o *target* de previsão imediata, são *inputs* para a construção do modelo.

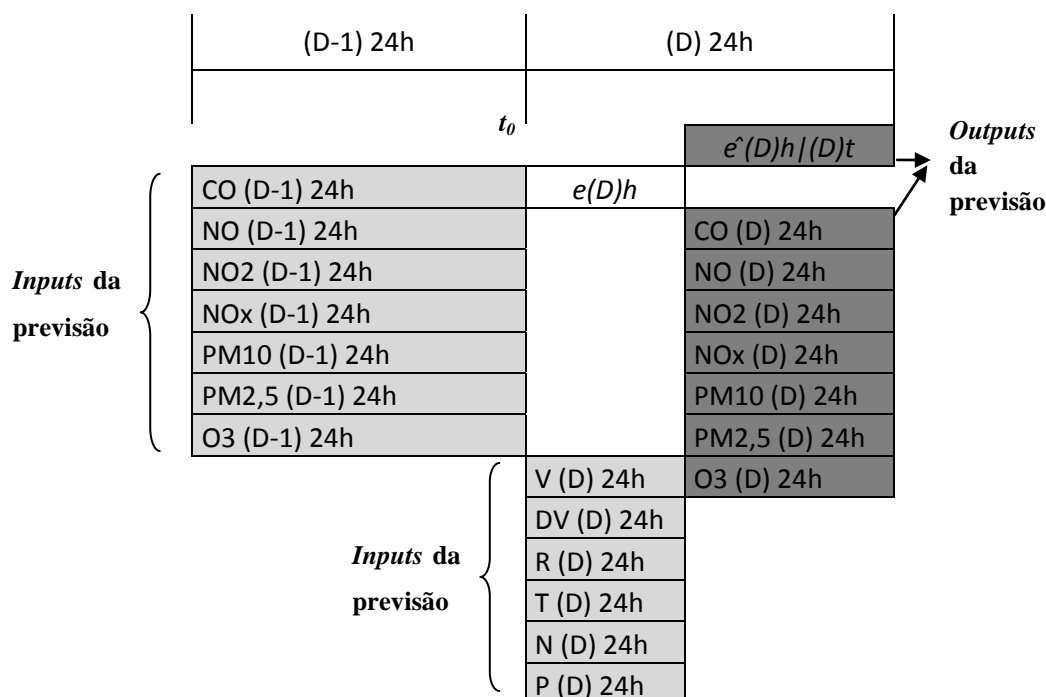


Figura 51 - Quadro temporal do modelo previsão.

Nomenclatura utilizada:

D – Dia da execução da previsão no âmbito do horizonte de previsão.

$t$  – Hora da execução da previsão em UTC, pode ser as 0h, 6h, 12h ou 18h.

$\hat{e}^{(D)h}/(D)t$  – Previsão das emissões  $e$  no momento  $t_0$  previsto para o dia D.

$e_{(D)h}$  - Emissões reais  $e$  na hora  $t$  do dia (D).

$h$  – Hora do dia, entre 0 e 23.

$s_{(D)}$  - Número do dia da semana, entre 1 (domingo) e 7 (sábado), para o dia (D).

$CO_{(D-1)h}$  – Agregado das concentrações horárias de CO, na hora  $h$ , medidos no dia (D-1), em ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$NO_{(D-1)h}$  – Agregado das concentrações horárias de NO, na hora  $h$ , medidos no dia (D-1), em ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$NOx_{(D-1)h}$  – Agregado das concentrações horárias de NOx, na hora  $h$ , medidos no dia (D-1), em ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$NO_2_{(D-1)h}$  – Agregado das concentrações horárias de NO<sub>2</sub>, na hora  $h$ , medidos no dia (D-1), em ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$PM_{10_{(D-1)h}}$  – Agregado das concentrações horárias de PM<sub>10</sub>, na hora  $h$ , medidos no dia (D-1), em ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$PM_{2,5_{(D-1)h}}$  – Agregado das concentrações horárias de PM<sub>2,5</sub>, na hora  $h$ , medidos no dia (D-1), em ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$O_3_{(D-1)h}$  – Agregado das concentrações horárias de O<sub>3</sub>, na hora  $h$ , medidos no dia (D-1), em ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$CO_{(D)h}$  – Agregado das concentrações horárias de CO, na hora  $h$ , previstas para o dia (D), em ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$NO_{(D)h}$  – Agregado das concentrações horárias de NO, na hora  $h$ , previstas para o dia (D), em ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$NOx_{(D)h}$  – Agregado das concentrações horárias de NOx, na hora  $h$ , previstas para o dia (D), em ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$NO_2_{(D)h}$  – Agregado das concentrações horárias de NO<sub>2</sub>, na hora  $h$ , previstas para o dia (D), em ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$PM_{10_{(D)h}}$  – Agregado das concentrações horárias de PM<sub>10</sub>, na hora  $h$ , previstas para o dia (D), em ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$PM_{2,5_{(D)h}}$  – Agregado das concentrações horárias de PM<sub>2,5</sub>, na hora  $h$ , previstas para o dia (D), em ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$O_3_{(D)h}$  – Agregado das concentrações horárias de O<sub>3</sub>, na hora  $h$ , previstas para o dia (D), em ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$V_{(D)h}$  – Agregado das previsões meteorológicas horárias da velocidade do vento, na hora  $h$ , para o dia (D), em m/s.

$DV_{(D)h}$  – Agregado das previsões meteorológicas horárias da direção do vento, na hora  $h$ , para o dia (D), em m/s.

$R_{(D)h}$  – Agregado das previsões meteorológicas horárias da radiação solar, na hora  $h$ , para o dia (D), em w/m<sub>2</sub>.

$T_{(D)h}$  – Agregado das previsões meteorológicas horárias da temperatura, na hora  $h$ , para o dia (D), em °C.  
 $N_{(D)h}$  – Agregado das previsões meteorológicas horárias do índice de nuvens, na hora  $h$ , para o dia (D), adimensional (0 e 1).  
 $P_{(D)h}$  – Agregado das previsões meteorológicas horárias da pluviosidade, na hora  $h$ , para o dia (D), em mm/m<sup>2</sup>.

Relativamente aos dados utilizados nesta investigação (*inputs*), a previsão da qualidade do ar é influenciada por diferentes tipos de variáveis explicativas:

- a) Registos históricos das emissões horárias dos poluentes em estudo (CO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> e O<sub>3</sub>), informações conhecidas até ao instante  $t_0$ .
- b) Variáveis cronológicas: hora, dia semana, número de semanas, meses. Este é um tipo de informação conhecida por dados históricos e futuros. Consistindo em conjuntos de dados fáceis de serem obtidos a partir de funções de calendário. Nesta investigação foram utilizadas as variáveis "hora" e "dia da semana".
- c) Previsões meteorológicas, incluindo velocidade e direção do vento, radiação solar, temperatura, índice de nuvens e pluviosidade, que podem ser previstos para o dia D. Foi utilizado um histórico de previsão do tempo, utilizando o modelo WRF de mesoescala, e este modelo foi criado pela empresa Smartwatt para pontos de previsão em Portugal.

Como referido anteriormente, a metodologia envolve a utilização de dois conjuntos de dados, um de treino da rede neuronal e outro de teste. Os dados de treino compreendem a totalidade do período de estudo, 1 de Abril de 2012 a 31 de Abril de 2014. Enquanto os dados de teste correspondem às semanas 23, 33, 43 e 53 em 2012, semanas 5, 15, 25 e 35 em 2013 e semanas 8 e 18 em 2014.

## 6.5 Configuração da Rede Neuronal

Como referido no subcapítulo 3.3.3, a estrutura de uma rede neuronal envolve a receção dos dados em entradas, que de seguida são propagados às camadas intermédias (ou ocultas) em que são processados os dados, assim como na camada de saída.

O tipo de rede utilizado foi o *feedforward*, que apresenta um funcionamento de uma forma progressiva, sem realimentação. Este tipo de redes por camadas já tem uma vasta utilização em aplicações de previsão comprovadas (Russo *et al.*, 2013) (Ghazali, 2012).

Relativamente ao número de neurónios da camada intermédia, foram definidos segundo a expressão  $2n+1$ , em que  $n$  corresponde ao número de variáveis de entradas na rede neuronal.

## **6.6 Resultados**

Nesta secção são apresentados os resultados das diversas previsões realizadas, sendo que o desempenho destes resultados tem como base a análise do erro MAPE e auxílio de gráficos ilustrativos da evolução das previsões.

A análise presente nesta secção tem a finalidade de avaliar os modelos de previsão construídos. É importante realçar o facto de que a melhor forma de avaliar um modelo de previsão é via observação gráfica, simultaneamente, das séries “Concentrações Reais” e “Concentrações Previstas”, de forma a que melhor se determine se a série “Concentrações Previstas” acompanha bem as tendências da série “Concentrações Reais”.

### **6.6.1 Previsão do CO**

O objetivo da construção destes modelos é a previsão das concentrações do monóxido de carbono para o dia D, e o estudo da influência das várias variáveis nos modelos de previsão.

De modo a ser perceptível a influência das várias variáveis foi adotada uma metodologia que consiste em testar inicialmente o modelo com todas as variáveis disponíveis e posteriormente, ir retirando uma variável de cada vez e analisar os resultados dos erros MAPE obtidos.

Na Figura 52 apresentam-se os resultados da previsão do CO para a semana 23 do ano de 2012, relativos à estação de Francisco Sá Carneiro (consultar Anexo II).

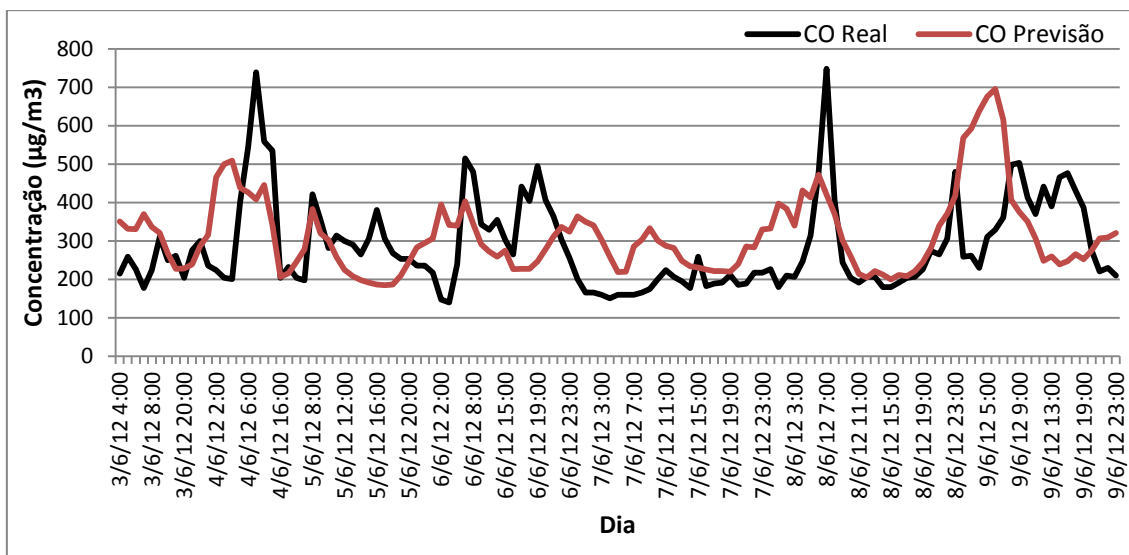


Figura 52 - Gráfico da previsão das concentrações do CO na semana 23 de 2012.

Ao analisar a Figura 52, é possível verificar que a série de concentrações previstas do CO apresenta algumas limitações, na sua capacidade de prever variações bruscas da concentração do poluente num curto intervalo de tempo.

Na Tabela 14, encontram-se todos os erros MAPES obtidos durante a fase de testes para o poluente CO. Sendo possível observar os MAPES das previsões individuais e o melhor resultado MAPE individual obtido de entre todos os modelos.

Tabela 14 - Erros MAPE para a previsão de CO.

Poluente T1	Modelo	Variáveis	MAPE %
CO (FSC)	M 1	Todas as variáveis	35,76%
	M2	Todas exceto V1	41,38%
	M3	Todas exceto V2	33,38%
	M 4	Todas exceto V3	37,16%
	M 5	Todas exceto V4	38,61%
	M 6	Todas exceto V5	35,47%
	M 7	Todas exceto V6	35,83%
	M 8	Todas exceto V7	35,04%
	M 9	Todas exceto V8	34,33%
	M 10	V1, V3,V4	35,85%
	M11	Todas exceto V2 e V8	34,29%
	M12	Todas exceto V2, V7,V8	34,34%
	M13	Todas exceto V2, V5, V7,V8	33,95%
	M 14	Todas exceto V2, D-1	46,39%

Legenda: O poluente em estudo é o CO (T1), na estação de Francisco Sá Carneiro (FSC). As variáveis foram classificadas como V1-hora, V2- dia da semana, V3-Velocidade do vento, V4- direção do vento, V5-radiação, V6-temperatura, V7-nuvens e V8-pluviosidade.

No que diz respeito aos resultados obtidos para a previsão do CO é de realçar que estes encontram-se com valores relativamente altos, pode ser devido à qualidade dos dados ou à pouca causalidade entre variáveis.

Em relação à previsão do CO, observou-se que a estratégia na organização metodológica apresentou bons resultados. O modelo com menor erro MAPE é o Modelo 3 (33,38%), em que entraram todas as variáveis na rede neuronal, exceto a variável dia da semana, que pelos resultados obtidos não tem grande influência sobre a previsão do CO.

### 6.6.2 Previsão do NO

O objetivo dos modelos apresentados nesta secção são a previsão das concentrações do NO para o dia D, e o estudo da influência das diferentes variáveis na construção dos modelos.

Tal como no poluente anterior, foi adotada a mesma metodologia de testar inicialmente o modelo com todas as variáveis disponíveis e de seguida, ir retirando gradualmente uma variável de cada vez e analisar os resultados dos erros MAPE obtidos.

Na Figura 53 apresentam-se os resultados da previsão do NO na estação de Francisco Sá Carneiro (FSC), para a semana 33 do ano de 2012. Enquanto que a na Figura 54 são apresentados os resultados da previsão do NO na estação de Sobreiras–Lordelo do Ouro (S-LO), para a mesma semana (consultar Anexo III).

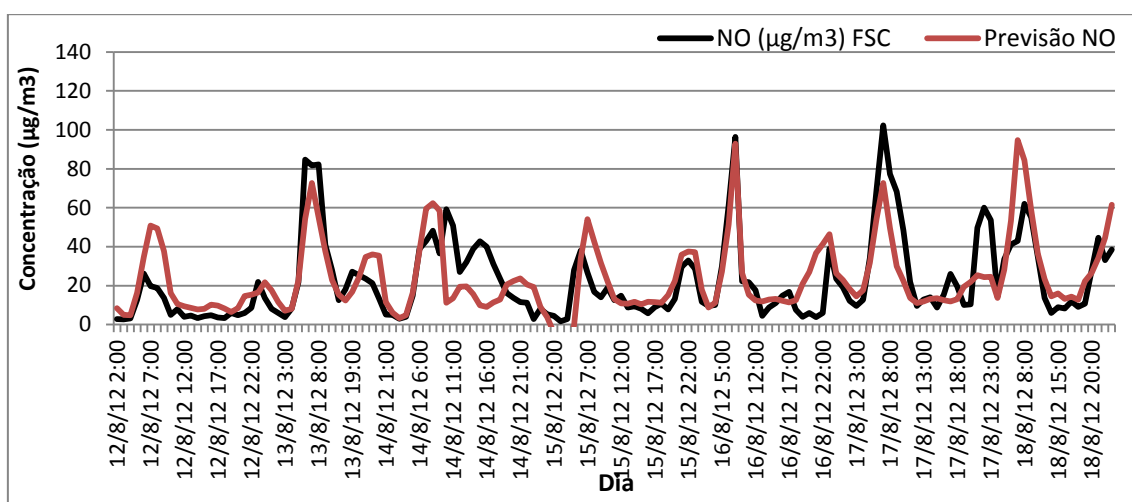


Figura 53 - Gráfico da previsão das concentrações do NO, para a estação de FSC na semana 33 de 2012.



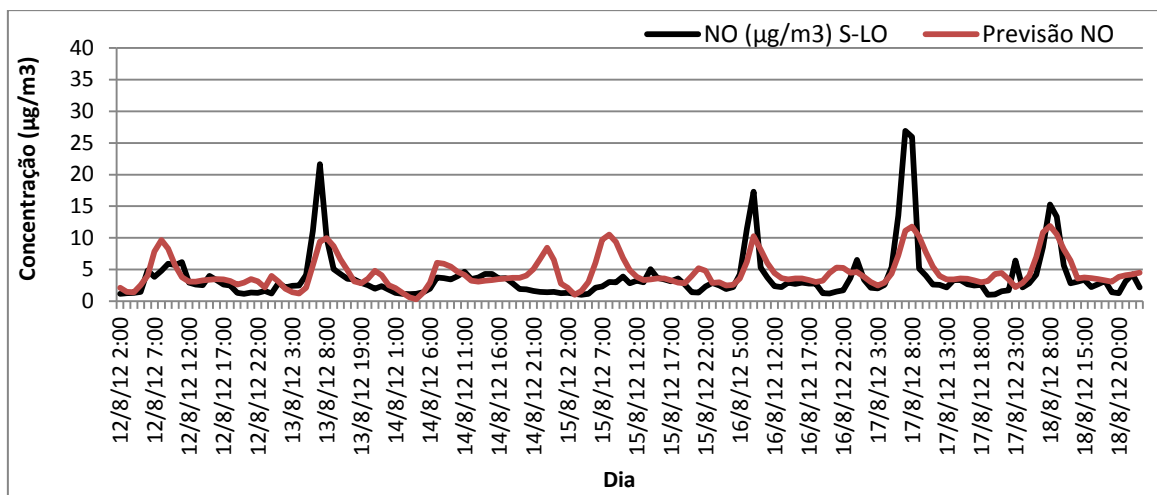


Figura 54 - Gráfico da previsão das concentrações do NO, para a estação de S-LO na semana 33 de 2012.

Em termos de previsões as Figuras 53 e 54 não diferem muito, contudo é possível observar que a previsão do NO em FSC é mais próxima da realidade, do que em S-LO. A diferença entre os níveis de concentrações entre os dois gráficos, deve-se ao tipo de influência a que as estações de monitorização estão sujeitas. Sendo que as concentrações registadas e previstas em FSC são muito superiores às de S-LO, uma vez que a primeira estação é de influência tráfego enquanto a segunda é de influência de fundo.

Na Tabela 15, encontram-se todos os erros MAPES obtidos durante a fase de testes para o poluente NO, para duas estações de monitorização em estudo. Sendo possível observar os MAPES das previsões individuais e o melhor resultado MAPE individual obtido de entre todos os modelos.

Tabela 15 - Erros MAPE para a previsão de NO, na estação de FSC e S-LO.

NO - T2 (FSC)			NO - T7 (S-LO)		
Modelo	Variáveis	MAPE %	Modelo	Variáveis	MAPE %
M 1	Todas	54,67%	M 1	Todas	83,03%
M2	Todas exceto V1	67,75%	M2	Todas exceto V1	84,81%
M3	Todas exceto V2	53,87%	M3	Todas exceto V2	79,49%
M 4	Todas exceto V3	58,18%	M 4	Todas exceto V3	84,69%
M 5	Todas exceto V4	60,28%	M 5	Todas exceto V4	78,29%
M 6	Todas exceto V5	53,66%	M 6	Todas exceto V5	83,65%
M 7	Todas exceto V6	54,99%	M 7	Todas exceto V6	91,71%
M 8	Todas exceto V7	56,17%	M 8	Todas exceto V7	83,83%
M 9	Todas exceto V8	53,85%	M 9	Todas exceto V8	83,35%
M 10	V1, V3, V4	57,13%	M 10	V1, V3, V7	77,50%
M11	V1, V3, V4, V7	54,76%	M11	V1, V3, V5, V7	82,63%

M12	Todas exceto V2 e V8	53,31%	M 12	Todas exceto V2 e V4	77,15%
M13	Todas exceto V2, V5, V8	53,33%	M 13	Todas exceto V2, V4, V8	76,41%
M14	Todas exceto V2, V5, V6,V8	55,59%	M 14	Todas exceto V2, V4, V5, V8	75,76%
M 15	Todas exceto V2 e V8, D-1	84,54%	M 15	Todas exceto V2, V4, V5, V8 + D-1	73,58%

Legenda: O poluente em estudo é o NO (T2), na estação de Francisco Sá Carneiro (FSC). E NO (T7), na estação de Sobreiras-Lordelo do Ouro (S-LO). As variáveis foram classificadas como V1-hora, V2- dia da semana, V3-Velocidade do vento, V4- direção do vento, V5-radiação, V6-temperatura, V7-nuvens e V8-pluviosidade.

No que diz respeito aos resultados obtidos para a previsão do NO é de realçar que estes encontram-se com valores muito altos, em ambas as estações de monitorização, não sendo possível prever com confiança o comportamento do poluente.

Em relação à previsão do NO observou-se que tal como no poluente anterior, a técnica e estratégia na organização metodológica apresentou bons resultados.

No caso da estação de FSC os modelos com menor erro MAPE foram o Modelo 12 (53,31%) e Modelo 13 (53,33%), sendo que a diferença entre os dois não é significativa (em relação à incerteza dos modelos, 3%). Nos dois modelos entraram todas as variáveis na rede neuronal, exceto a variável dia da semana e pluviosidade no Modelo 12, e as variáveis dia da semana, radiação e pluviosidade no Modelo 13, que aparentemente não têm influência sobre a previsão do NO.

Em relação à estação de S-LO os melhores modelos são o Modelo 15 (73,58%) e o Modelo 14 (75,76%). Nos dois modelos entraram todas as variáveis exceto o dia da semana, a direção do vento, a radiação e a pluviosidade, sendo que no Modelo 15 foi adicionada a variável D-1. É importante analisar o resultado do Modelo 7, cujo erro MAPE aumentou bastante em comparação com os restantes modelos (91,71%), quando foi retirada a variável temperatura. Apesar de se tratar de uma variável baseada em previsões meteorológicas (que podem acrescentar alguma imprevisibilidade ao modelo), este comportamento dá uma indicação da importância desta variável na previsão do NO. Através destes resultados é possível afirmar que as variáveis que melhor explicam o comportamento do NO em S-LO são a hora, a velocidade do vento e a temperatura.

### 6.6.3 Previsão do NO<sub>2</sub>

Os modelos apresentados nesta secção têm como objetivo a previsão das concentrações do NO<sub>2</sub> para o dia D, assim como o estudo da influência das várias variáveis na construção dos modelos.

Com a finalidade de estudar a influência das variáveis no comportamento do NO<sub>2</sub>, foi adotada uma metodologia de iniciar a testar os modelos com o conjunto de todas as variáveis disponíveis e de progressivamente, retirar uma variável de cada vez. Através da análise dos resultados dos erros MAPE obtidos, combinaram-se as variáveis que apresentavam melhores resultados nos últimos modelos construídos.

Na Figura 55 apresentam-se os resultados das previsões do NO<sub>2</sub> na estação de Francisco Sá Carneiro (FSC), para a semana 43 do ano de 2012. Enquanto na Figura 56 são apresentados os resultados da previsão do NO<sub>2</sub> na estação de Sobreiras – Lordelo do Ouro (S-LO), para a mesma semana (consultar Anexo IV).

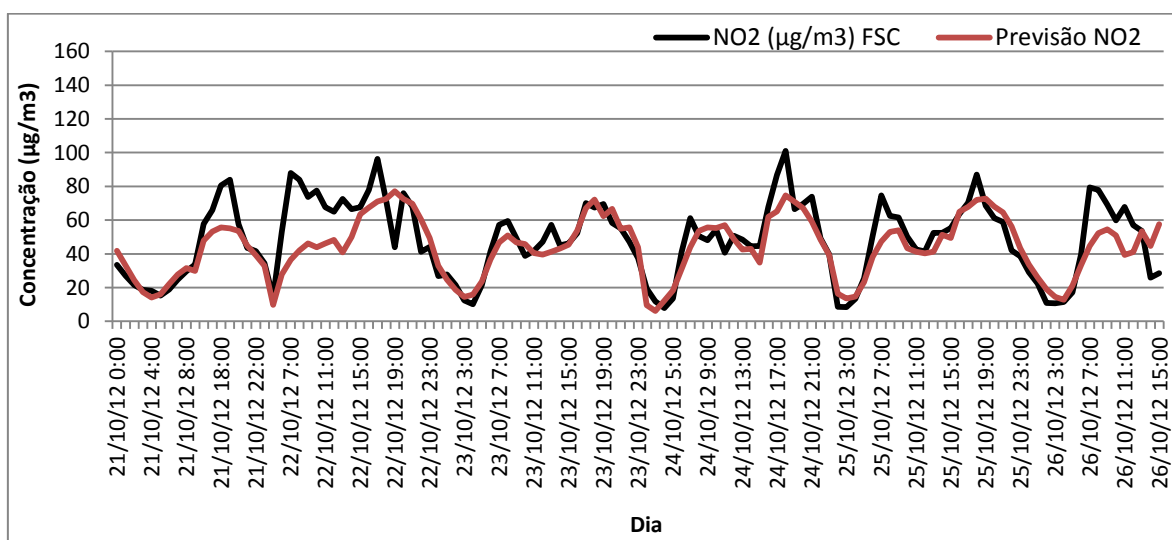


Figura 55 - Gráfico da previsão das concentrações do NO<sub>2</sub>, para a estação de FSC na semana 43 de 2012.

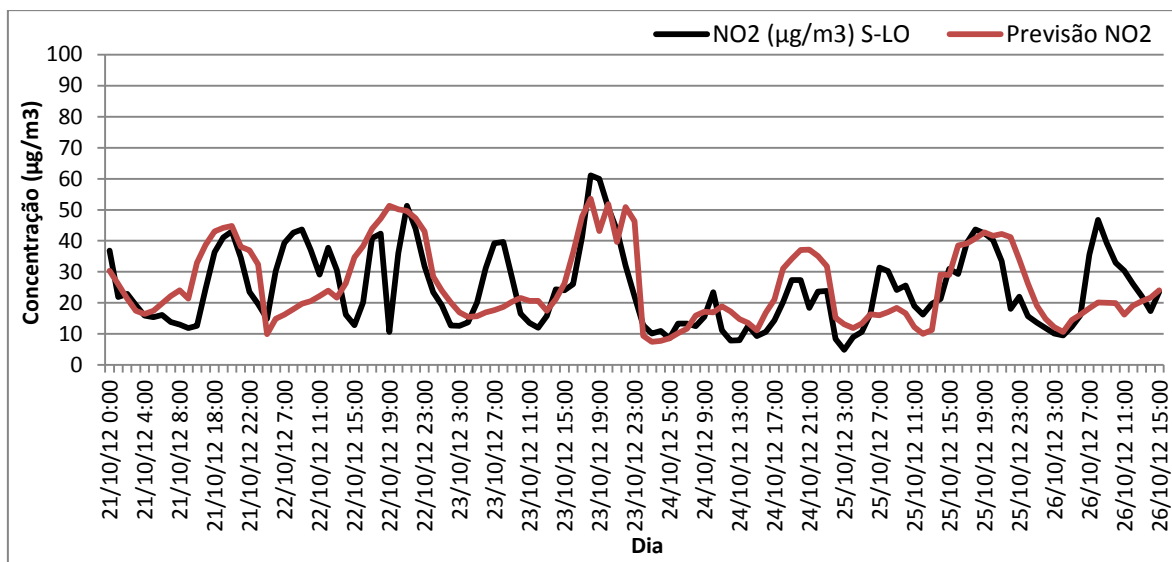


Figura 56 - Gráfico da previsão das concentrações do NO<sub>2</sub>, para a estação de S-LO na semana 43 de 2012.

Relativamente às previsões apresentadas nas Figuras 55 e 56, verifica-se que a utilização dos modelos de previsão presentes em ambos os gráficos efetuam uma previsão que acompanha aproximadamente os valores das concentrações reais do NO<sub>2</sub>. Sendo possível observar que a previsão do NO<sub>2</sub> em FSC é mais precisa, do que em S-LO.

Na Tabela 16, são apresentados todos os erros MAPES obtidos durante a fase de testes para o poluente NO<sub>2</sub>, para duas estações de monitorização em estudo. Sendo possível observar os MAPES das previsões individuais e o melhor resultado MAPE individual obtido de entre todos os modelos.

Tabela 16 - Erros MAPE para a previsão de NO<sub>2</sub>, na estação de FSC e S-LO.

NO2 - T3 (FSC)			NO2 - T8 (S-LO)		
Modelo	Variáveis	MAPE %	Modelo	Variáveis	MAPE %
M 1	Todas	34,06%	M 1	Todas	40,04%
M2	Todas exceto V1	43,06%	M2	Todas exceto V1	42,40%
M3	Todas exceto V2	34,10%	M3	Todas exceto V2	38,53%
M 4	Todas exceto V3	37,31%	M 4	Todas exceto V3	42,86%
M 5	Todas exceto V4	37,75%	M 5	Todas exceto V4	45,79%
M 6	Todas exceto V5	34,30%	M 6	Todas exceto V5	40,00%
M 7	Todas exceto V6	35,66%	M 7	Todas exceto V6	42,43%
M 8	Todas exceto V7	33,97%	M 8	Todas exceto V7	39,92%
M 9	Todas exceto V8	33,43%	M 9	Todas exceto V8	39,94%

M 10	V1, V3, V4, V6	36,06%	M 10	V1, V3,V4,V6	39,90%
M 11	V1, V3, V4	37,04%	M 11	Todas exceto V2 e V7	38,77%
M 12	V2,V5,V7,V8	47,82%	M 12	Todas exceto V2, V7, V8	39,94%
M 13	V1, V4	39,70%	M 13	Todas exceto V2, V5, V7, V8	39,49%
M 14	Todas exceto V7 e V8	34,10%	M 14	Todas exceto V2 + D-1	59,52%
M 15	Todas exceto V2, V7, V8	34,62%			
M 16	Todas exceto V2, V5, V7, V8	35,56%			
M 17	Todas exceto V8, D-1	53,50%			

Legenda: O poluente em estudo é o NO<sub>2</sub> (T3), na estação de Francisco Sá Carneiro (FSC). E NO<sub>3</sub> (T8), na estação de Sobreiras-Lordelo do Ouro (S-LO). As variáveis foram classificadas como V1-hora, V2-dia da semana, V3-Velocidade do vento, V4- direção do vento, V5-radiação, V6-temperatura, V7-nuvens e V8-pluviosidade.

Em relação aos resultados MAPE obtidos para a previsão do NO<sub>2</sub> estes encontram-se ligeiramente altos, em ambas as estações de monitorização, sendo um pouco mais altos na estação S-LO.

Na construção dos modelos de previsão do NO<sub>2</sub> foi aplicada a mesma técnica de metodologia.

No caso da estação de FSC os modelos com menor erro MAPE foram o Modelo 8 (33,97%) e Modelo 9 (33,43%), sendo que a diferença entre os dois não é significativa. Em ambos os modelos entraram todas as variáveis na rede neuronal, exceto a variável nuvens no Modelo 8 e pluviosidade no Modelo 9, que pelos resultados obtidos não têm influência sobre a previsão do NO.

Em relação à estação de S-LO os melhores modelos são o Modelo 3 (38,53%) e o Modelo 11 (38,77%). Em ambos os modelos entraram todas as variáveis exceto o dia da semana no Modelo 3, e as variáveis dia da semana e nuvens no Modelo 11.

Através destes resultados é possível afirmar que na estação de FSC as variáveis nuvens e pluviosidade não têm influência na previsão do NO, enquanto que na estação de S-LO o dia da semana e as nuvens são as variáveis com menor influência para a previsão.

#### 6.6.4 Previsão do NO<sub>x</sub>

Esta secção tem como finalidade apresentar os resultados da previsão das concentrações do NO<sub>x</sub> para o dia D, bem como o estudo da influência das diferentes variáveis na construção dos modelos de previsão.

Igualmente aos outros casos apresentados anteriormente, foi adotada a mesma metodologia de começar a testar os modelos com o conjunto total das variáveis disponíveis e de progressivamente, retirar uma variável de cada vez.

Na Figura 77 apresentam-se os resultados das previsões do NO<sub>x</sub> na estação de Francisco Sá Carneiro (FSC), para a semana 33 do ano de 2012. Enquanto na Figura 78 são apresentados os resultados da previsão do NO<sub>x</sub> na estação de Sobreiras – Lordelo do Ouro (S-LO), para a mesma semana (consultar Anexo V).

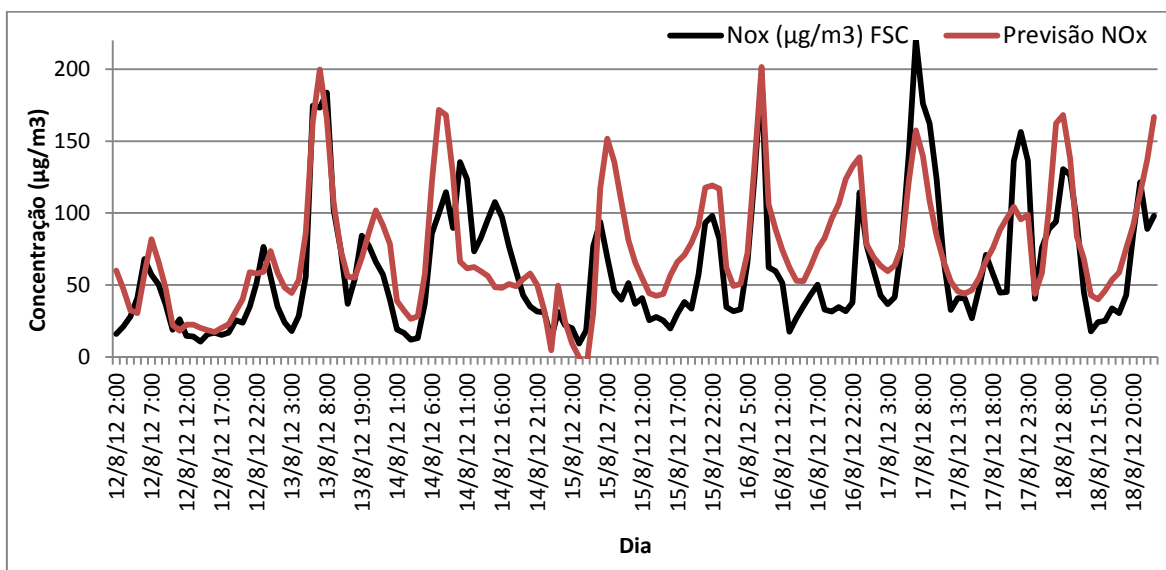


Figura 57 - Gráfico da previsão das concentrações do NO<sub>x</sub>, para a estação de FSC na semana 33 de 2012.

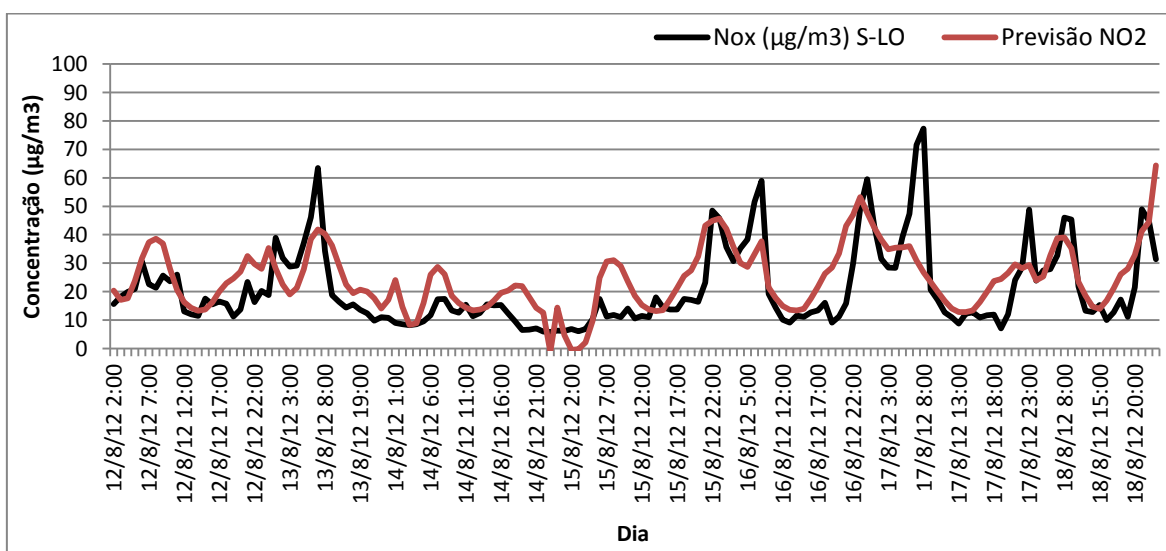


Figura 58 - Gráfico da previsão das concentrações do NO<sub>x</sub>, para a estação de S-LO na semana 33 de 2012.

Relativamente às previsões apresentadas nas Figuras 57 e 58 estas não são muito diferentes entre si, acompanhando de forma semelhante as concentrações reais do NO<sub>x</sub>. Tal como no NO, existe uma grande diferença dos níveis de concentrações entre as duas estações de monitorização, que são explicados pelo tipo de influência das estações. Sendo possível constatar que as concentrações registadas e previstas em FSC são bastante superiores às de S-LO, pois a estação FSC é de influência de tráfego e a de S-LO é de influência de fundo.

Na Tabela 17, encontram-se os erros MAPES obtidos na construção dos modelos de previsão para o poluente NO<sub>x</sub>, para as duas estações de monitorização em estudo. Sendo possível observar os MAPES das previsões individuais e o melhor resultado MAPE individual obtido de entre todos os modelos.

Em relação aos resultados MAPE obtidos para a previsão do NO<sub>x</sub> estes são ligeiramente altos, em ambas as estações de monitorização.

Tabela 17 - Erros MAPE para a previsão de NO<sub>x</sub>, na estação de FSC e S-LO.

NO <sub>x</sub> - T4 (FSC)			NO <sub>x</sub> - T9 (S-LO)		
Modelo	Variáveis	MAPE %	Modelo	Variáveis	MAPE %
M 1	Todas	43,19%	M 1	Todas	44,78%
M2	Todas exceto V1	53,41%	M2	Todas exceto V1	48,73%
M3	Todas exceto V2	43,34%	M3	Todas exceto V2	45,20%
M 4	Todas exceto V3	45,36%	M 4	Todas exceto V3	48,24%
M 5	Todas exceto V4	47,48%	M 5	Todas exceto V4	49,92%
M 6	Todas exceto V5	41,88%	M 6	Todas exceto V5	43,97%
M 7	Todas exceto V6	42,82%	M 7	Todas exceto V6	47,46%
M 8	Todas exceto V7	43,79%	M 8	Todas exceto V7	44,34%
M 9	Todas exceto V8	42,69%	M 9	Todas exceto V8	45,51%
M 10	V1, V3, V4	45,22%	M 10	V1, V3, V4, V6	44,09%
M11	V1, V4	48,45%	M 11	Todas exceto V5 e V7	45,10%
M12	V1, V3, V4, V7	43,59%	M 12	Todas exceto V2, V5, V7	42,74%
M 13	Todas exceto V5 e V6	42,63%	M 13	Todas exceto V2, V5, V7, V8	44,36%
M 14	Todas exceto V5, V6, V8	43,13%	M 14	Todas exceto V2, V5, V7 + D-1	60,76%
M 15	Todas exceto V2, V5, V6, V8	49,87%			
M 16	Todas exceto V5, D-1	68,70%			

Legenda: O poluente em estudo é o NO<sub>x</sub> (T4), na estação de Francisco Sá Carneiro (FSC). E NO<sub>x</sub> (T9), na estação de Sobreiras-Lordelo do Ouro (S-LO). As variáveis foram classificadas como V1-hora, V2-dia da semana, V3-Velocidade do vento, V4- direção do vento, V5-radiação, V6-temperatura, V7-nuvens e V8-pluviosidade.

Na construção dos modelos de previsão do  $\text{NO}_x$  foi aplicada a mesma técnica de metodologia, aplicada nos poluentes anteriormente descritos.

Relativamente à estação de FSC os modelos com menor erro MAPE foram o Modelo 6 (41,88%) e Modelo 13 (42,63%), sendo que a diferença entre os dois não é significativa. Nos dois modelos entraram todas as variáveis na rede neuronal, exceto a variável radiação no Modelo 6 e as variáveis radiação e temperatura Modelo 13. Em relação à estação de S-LO os melhores modelos são o Modelo 6 (43,97%) e o Modelo 12 (42,74%). Em ambos os modelos entraram todas as variáveis exceto a variável radiação no Modelo 6, e as variáveis dia da semana, radiação, e nuvens no Modelo 12.

Através destes resultados é possível afirmar que na estação de FSC as variáveis radiação e temperatura não têm grande na previsão do  $\text{NO}_x$ , enquanto que na estação de S-LO o dia da semana, a radiação e as nuvens são as variáveis com menor influência para a previsão.

#### **6.6.5 Previsão das $\text{PM}_{10}$**

Nesta secção são apresentados os resultados da previsão das concentrações das  $\text{PM}_{10}$  para o dia D, e efetuado o estudo da influência das diferentes variáveis na construção dos modelos de previsão.

De forma semelhante aos outros casos apresentados anteriormente, foi adotada a mesma metodologia de iniciar os testes dos modelos com o conjunto do total variáveis disponíveis e de progressivamente, retirar uma variável de cada vez.

Na Figura 59 apresentam-se os resultados das previsões das  $\text{PM}_{10}$  na estação de Francisco Sá Carneiro (FSC), para a semana 25 do ano de 2013. Enquanto que a na Figura 60 são apresentados os resultados da previsão do  $\text{NO}_x$  na estação de Sobreiras – Lordelo do Ouro (S-LO), para a semana 33 de 2012 (consultar Anexo VI).



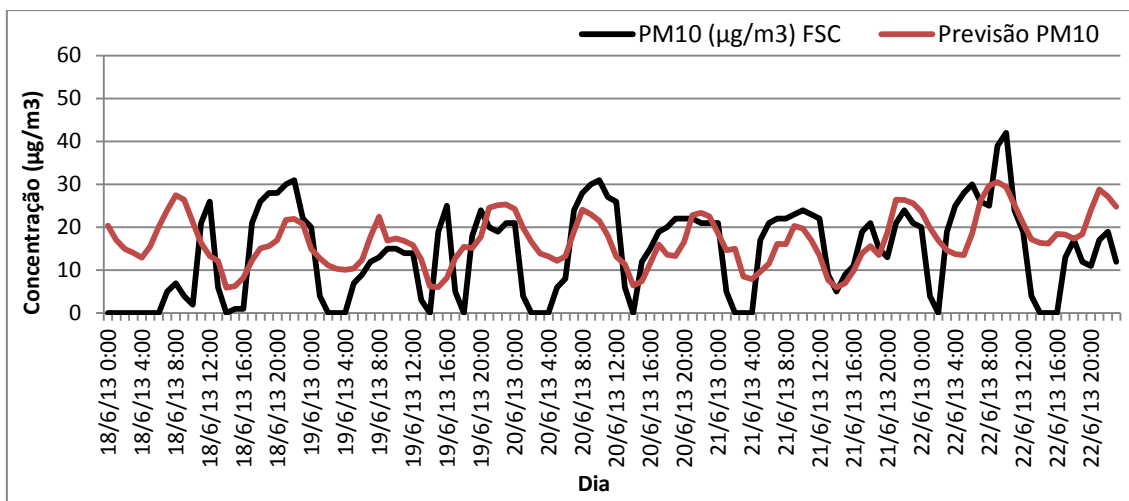


Figura 59 - Gráfico da previsão das concentrações das PM<sub>10</sub>, para a estação de FSC na semana 25 de 2013.

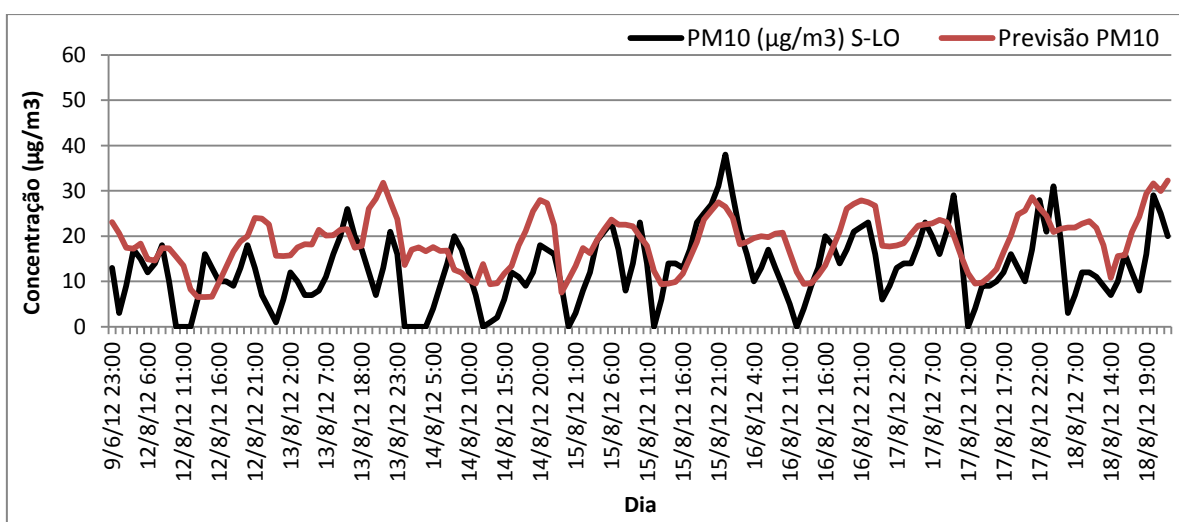


Figura 60 - Gráfico da previsão das concentrações das PM<sub>10</sub>, para a estação de S-LO na semana 33 de 2012.

A partir da observação das Figuras 59 e 60 é possível concluir que existem muitas disparidades entre os valores previstos e os valores reais das concentrações de PM<sub>10</sub>, em ambas as estações de monitorização. Estes resultados indicam que através das variáveis de entrada na rede neuronal, ou do método de previsão aplicado, não permite realizar previsões fiáveis no que diz respeito às PM<sub>10</sub>.

Na Tabela 18, encontram-se os erros MAPES obtidos na construção dos modelos de previsão para as PM<sub>10</sub>, para as duas estações de monitorização. Sendo possível observar os MAPES das previsões individuais e o melhor resultado MAPE individual obtido de entre todos os modelos.

Tabela 18 - Erros MAPE para a previsão de PM<sub>10</sub>, na estação de FSC e S-LO.

PM10 - T5 (FSC)			PM10 - T10 (S-LO)		
Modelo	Variáveis	MAPE %	Modelo	Variáveis	MAPE %
M 1	Todas	55,19%	M 1	Todas	56,89%
M2	Todas exceto V1	59,88%	M2	Todas exceto V1	60,10%
M3	Todas exceto V2	55,34%	M3	Todas exceto V2	56,69%
M 4	Todas exceto V3	56,26%	M 4	Todas exceto V3	58,89%
M 5	Todas exceto V4	55,55%	M 5	Todas exceto V4	55,88%
M 6	Todas exceto V5	56,64%	M 6	Todas exceto V5	58,27%
M 7	Todas exceto V6	62,07%	M 7	Todas exceto V6	63,15%
M 8	Todas exceto V7	55,90%	M 8	Todas exceto V7	57,71%
M 9	Todas exceto V8	55,62%	M 9	Todas exceto V8	57,19%
M 10	V1, V5,V6	57,88%	M 10	V1,V3,V5,V6	56,26%
M 11	v1, V6	59,28%	M 11	Todas exceto V2, V4	54,93%
M12	V1, v3, v5,V6	55,96%	M 12	Todas exceto V2, V4, V8	55,15%
M 13	Todas exceto V2, V8	55,11%	M 13	Todas exceto V2, V4, V7, V8	57,17%
M 14	Todas exceto V2, V4, V8	54,62%	M 14	Todas exceto V2, V4 + D-1	73,44%
M 15	Todas exceto V2, V4, V7, V8	57,03%			
M 16	Todas exceto V2, V4, V8 + D-1	72,13%			

Legenda: O poluente em estudo é o PM<sub>10</sub> (T5), na estação de Francisco Sá Carneiro (FSC). E PM<sub>10</sub> (T10), na estação de Sobreiras-Lordelo do Ouro (S-LO). As variáveis foram classificadas como V1-hora, V2- dia da semana, V3-Velocidade do vento, V4- direção do vento, V5-radiação, V6-temperatura, V7-nuvens e V8-pluviosidade.

Em relação aos resultados MAPE obtidos para a previsão das PM<sub>10</sub> estes são muito altos, em ambas as estações de monitorização.

Relativamente à estação de FSC os modelos com menor erro MAPE foram o Modelo 13 (55,11%) e Modelo 14 (55,15%), sendo que a diferença entre os dois não é significativa. Nos dois modelos entraram todas as variáveis na rede neuronal, exceto as variáveis dia da semana e pluviosidade no Modelo 13, e as variáveis dia da semana, direção do vento e pluviosidade Modelo 14.

Em relação à estação de S-LO os melhores modelos são o Modelo 11 (54,93%) e o Modelo 12 (55,15%). Em ambos os modelos entraram todas as variáveis exceto a variável dia da semana e direção do vento no Modelo 11, e as variáveis dia da semana, direção do vento e pluviosidade Modelo 12.

Uma vez que os valores MAPE são tão altos não seria uma análise fiável e segura indicar as variáveis que produzem uma previsão correta do comportamento das PM<sub>10</sub>. Contudo, os resultados em ambas as estações indicam que as variáveis que têm menor

influência no comportamento das partículas são as variáveis dia da semana, direção do vento e pluviosidade.

### 6.6.6 Previsão das PM<sub>2,5</sub>

O objetivo deste modelo é a previsão das concentrações das PM<sub>2,5</sub> para o dia D, e o estudo da influência das várias variáveis para a construção deste modelo de previsão.

A metodologia utilizada para a construção dos modelos de previsão deste poluente foi a mesma utilizada nos poluentes já apresentados. Iniciou-se o teste dos modelos com a totalidade das variáveis disponíveis e posteriormente, foram retiradas uma variável de cada vez e analisar os resultados do MAPE obtido.

Na Figura 61 apresentam-se os resultados da previsão do PM<sub>2,5</sub> para a semana 23 do ano de 2012, na estação de Francisco Sá Carneiro (consultar Anexo VII).

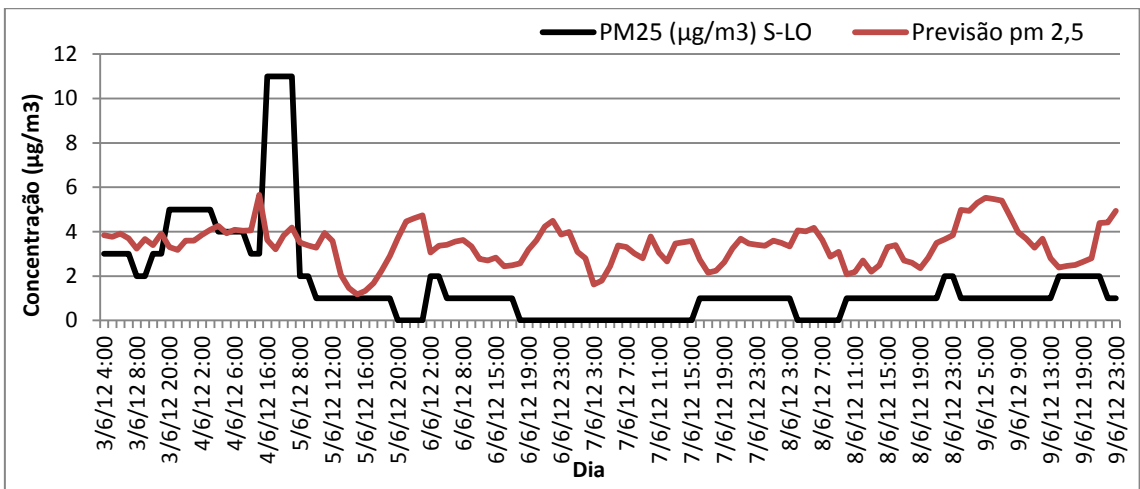


Figura 61 - Gráfico da previsão das concentrações das PM<sub>2,5</sub>, para a estação de S-LO na semana 23 de 2012.

Pela observação do gráfico em cima apresentado é completamente impossível prever as concentrações das PM<sub>2,5</sub>, tal como pela análise da tabela dos erros MAPE obtidos na construção dos modelos de previsão (Tabela 19).

Tabela 19 - Erros MAPE para a previsão de PM<sub>2,5</sub>, na estação de S-LO.

Poluente T6	Modelo	Variáveis	MAPE %
PM <sub>2,5</sub> (S LO)	M 1	Todas	105,59%
	M2	Todas exceto V1	107,92%
	M3	Todas exceto V2	105,07%
	M 4	Todas exceto V3	109,05%
	M 5	Todas exceto V4	102,80%

M 6	Todas exceto V5	107,86%
M 7	Todas exceto V6	107,54%
M 8	Todas exceto V7	107,24%
M 9	Todas exceto V8	107,17%
M 10	V1,V3, V5	103,72%
M11	V1,V3, V5, V6	103,09%
M12	V1, V3	105,80%
M 14	Todas exceto V2 e V4	102,30%
M 15	Todas exceto V2, V4, V8	102,34%
M 16	Todas exceto V2, V4,V7, V8	102,71%
M 17	Todas exceto V2 e V4 + D-1	118,64%

Legenda: O poluente em estudo é o  $PM_{2,5}$  (T6), na estação de Sobreiras-Lordelo do Ouro (S-LO). As variáveis foram classificadas como V1-hora, V2- dia da semana, V3-Velocidade do vento, V4- direção do vento, V5-radiação, V6-temperatura, V7-nuvens e V8-pluviosidade.

Em relação aos resultados MAPE obtidos para a previsão das  $PM_{2,5}$  estes são extremamente altos, não sendo possível encontrar um modelo que consiga prever as concentrações das  $PM_{2,5}$  com um mínimo de segurança.

O modelo que apresentou um menor erro MAPE foi o Modelo 14 (102,30%), em que ao conjunto de todas as variáveis foram retiradas as variáveis dia da semana e direção do vento. A razão destes resultados pode estar diretamente relacionada com a natureza instável das partículas e qualidade dos dados de entrada na rede neuronal. Pode ainda estar relacionado com a seleção das variáveis em estudo ou mesmo com o método de previsão aplicado.

### 6.6.7 Previsão do $O_3$

O objetivo dos modelos apresentados nesta secção são a previsão das concentrações do  $O_3$  para o dia D, assim como o estudo da influência das várias variáveis para a construção deste modelo de previsão.

A metodologia utilizada na construção dos modelos de previsão do ozono foi a mesma aplicada nos outros poluentes. Os modelos foram testados inicialmente com a totalidade das variáveis disponíveis e posteriormente, foram retiradas uma variável de cada vez e analisar os resultados do MAPE obtido.

Na Figura 62 apresentam-se os resultados da previsão do  $O_3$  para a semana 33 do ano de 2012, na estação de Sobreiras-Lordelo do Ouro (consultar Anexo VIII).

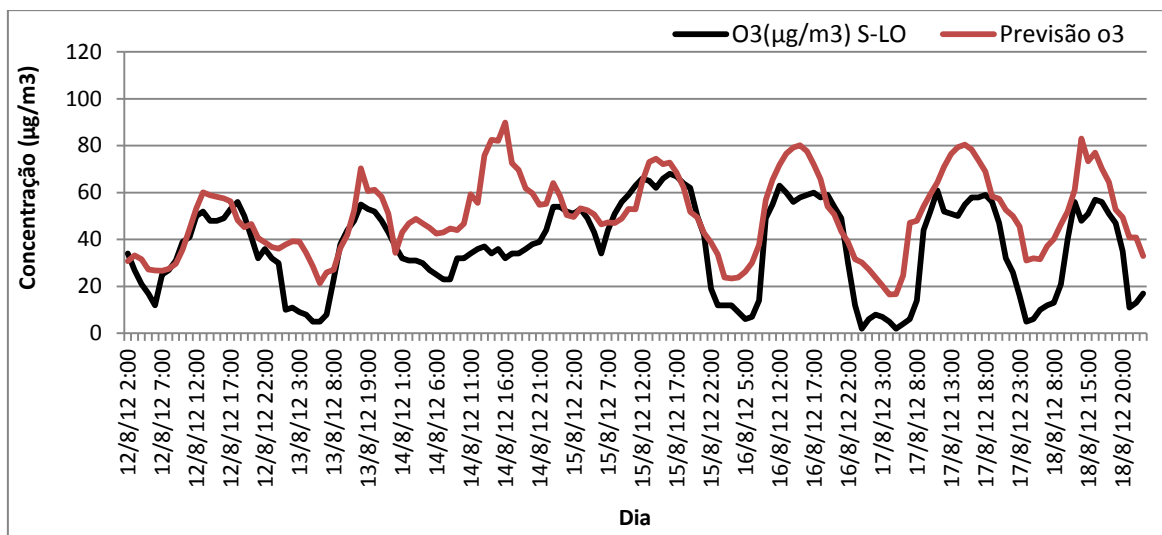


Figura 62 - Gráfico da previsão das concentrações do O<sub>3</sub>, para a estação de S-LO na semana 33 de 2012.

Relativamente à previsão apresentada na Figura 62, esta consegue acompanhar minimamente as oscilações reais registadas do ozono, não sendo muito precisa.

Na Tabela 20, encontram-se os erros MAPES obtidos na construção dos modelos de previsão para o O<sub>3</sub>, para a estação de Sobreiras-Lordelo do Ouro. Sendo possível observar os MAPES das previsões individuais e o melhor resultado MAPE individual obtido de entre todos os modelos.

Tabela 20 - Erros MAPE para a previsão do O<sub>3</sub>, na estação de S-LO.

Poluente T11	Modelo	Variáveis	MAPE %
O <sub>3</sub> (S LO)	M 1	Todas	37,50%
	M2	Todas exceto V1	36,90%
	M3	Todas exceto V2	35,48%
	M 4	Todas exceto V3	37,11%
	M 5	Todas exceto V4	37,16%
	M 6	Todas exceto V5	38,53%
	M 7	Todas exceto V6	40,21%
	M 8	Todas exceto V7	37,74%
	M 9	Todas exceto V8	36,67%
	M 10	V5, V6,V7	37,41%
	M 11	Todas exceto V2, V8	36,61%
	M 12	Todas exceto V2, V7, V8	36,46%
	M 13	Todas exceto V1, V2, V7, V8	35,78%
	M 14	Todas exceto V2 + D-1	41,63%

Legenda: O poluente em estudo é o O<sub>3</sub> (T11), na estação de Sobreiras-Lordelo do Ouro (S-LO). As variáveis foram classificadas como V1-hora, V2- dia da semana, V3-Velocidade do vento, V4- direção do vento, V5-radiação, V6-temperatura, V7-nuvens e V8-pluviosidade.

Em relação aos resultados MAPE obtidos para a previsão do  $O_3$  estes encontram-se ligeiramente altos, na estação S-LO.

Na construção dos modelos de previsão do  $O_3$  foi aplicada a mesma técnica de metodologia adotada nos outros poluentes.

Relativamente ao  $O_3$  os modelos com menor erro MAPE foram o Modelo 3 (35,48%) e Modelo 13 (35,78%), sendo que a diferença entre os dois não é significativa. Em ambos os modelos entraram todas as variáveis na rede neuronal, exceto a variável dia da semana no Modelo 3 e as variáveis hora, dia da semana, nuvens e pluviosidade no Modelo 13.

## **6.7 Comparação dos Resultados dos Modelos**

Neste subcapítulo pretende-se comparar os diferentes desempenhos dos modelos construídos, através da análise da evolução dos erros MAPE obtidos, para o período em estudo.

O objetivo principal deste capítulo consistia na criação de modelos de previsão para os sete poluentes em estudo ( $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $NO_x$ ,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  e  $O_3$ ), e estudar a influência das várias variáveis no comportamento destes mesmos poluentes.

Partindo da premissa que a própria natureza química dos sete poluentes difere entre si, e de que consequentemente, reagem de forma diferente à influência das variáveis de carácter meteorológico, é lógico concluir que teremos resultados diferentes no estudo de cada um dos poluentes químicos.

Os resultados obtidos em relação ao monóxido de carbono ( $CO$ ), apresentam erros MAPE ligeiramente altos, e os resultados sugerem que a variável menos influente no comportamento do  $CO$  é o dia da semana (Modelo 3, do poluente T1).

Relativamente aos poluentes  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $NO_x$ , faz sentido analisar os resultados destes três poluentes, devido à sua natureza química. Em relação ao  $NO$  as variáveis como menor influência são dia da semana, pluviosidade e radiação nas duas estações de monitorização, sendo que na estação de S-LO a variável direção do vento também foi identificada. No caso do  $NO_2$  as variáveis com menor influência são dia da semana, nuvens e pluviosidade. E para o  $NO_x$  as variáveis dia da semana, radiação, temperatura

e nuvens, foram as que não conseguem prever o comportamento do poluente com tanta eficácia como as restantes variáveis.

Em forma de conclusão, é unânime que a variável dia da semana não consegue prever o comportamento dos três poluentes, a variável pluviosidade não explica o comportamento do NO e NO<sub>2</sub>, assim como a variável nuvens para o NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>.

Em relação às partículas, tanto as PM<sub>10</sub> como as PM<sub>2,5</sub>, apresentam resultados de erros MAPE muito elevados, sendo que no caso das PM<sub>2,5</sub> não é possível prever o comportamento deste poluente. Para as PM<sub>10</sub> as variáveis que apresentam uma menor influência sobre a previsão do seu comportamento são o dia da semana, a direção do vento e a pluviosidade, nas duas estações de monitorização. Os resultados das PM<sub>2,5</sub> indicam que as variáveis com menor influência são dia da semana e direção do vento, contudo os valores elevados dos erros não permitem atribuir confiança a estes resultados.

A razão pela qual os resultados dos erros verificados para as PM<sub>2,5</sub> serem tão altos, pode ser atribuída à escolha das variáveis de input ou ao próprio método de previsão escolhido. Existe um estudo cujo objetivo é melhorar a previsão da qualidade do ar, relativa às PM<sub>2,5</sub>, realizado em Kentucky (EUA), um modelo de previsão das PM<sub>2,5</sub> projetado para uso apenas nas estações quentes, de Maio a Setembro, quando os valores de PM<sub>2,5</sub> são mais críticos. Este modelo das PM<sub>2,5</sub> consiste num modelo de regressão não linear, desenvolvido para utilização com um sistema automatizado de previsão da qualidade do ar, com um parâmetro adicional com base na concentração PM<sub>2,5</sub>, chamado PM<sub>24</sub>.

O parâmetro PM<sub>24</sub> é projetado para ser determinado manualmente, podendo ser utilizado por especialistas de qualidade do ar para ajustar a previsão fornecida pelo sistema de previsão automatizado. Os modelos que incorporam as concentrações do parâmetro PM<sub>24</sub> apresentaram uma menor média de erros absolutos e maiores taxas de deteção de concentrações de PM<sub>2,5</sub> em relação aos outros modelos (Cobourn, 2010). Outros estudos afirmam ainda que ao aplicar o *Kalman Filter Predictor*<sup>8</sup>, esta técnica melhora a previsão das PM<sub>2,5</sub>, reduzindo erros e aumentando o coeficiente de correlação (Kang *et al.*, 2010).

---

<sup>8</sup> Esta técnica consiste na aplicação de um algoritmo projetado para estimar termos ajustados, utilizando informação disponível de registos e previsões anteriores.

Relativamente ao  $O_3$ , os resultados indicam que as variáveis com menor influência sobre o poluente são a hora, dia da semana, nuvens e pluviosidade.



# Capítulo 7

## Considerações Finais

Segundo a afirmação do diretor executivo da EEA, Hans Bruynincks (2013), “a poluição atmosférica está a causar danos na saúde humana e nos ecossistemas. De acordo com a legislação em vigor, grandes grupos populacionais não vivem em ambientes saudáveis. De forma a atingir um percurso sustentável, a Europa terá que ser ambiciosa e agir além da legislação atual” (EEA, 2013b).

O comissário do ambiente, Janez Potočnik, acrescentou ainda: "A qualidade do ar é uma preocupação fulcral para muitas pessoas. Pesquisas mostram que a uma grande parte dos cidadãos entendem bem o impacto da qualidade do ar na saúde e estão a pedir às autoridades públicas que tomem medidas a nível comunitário, nacional e local, mesmo em tempos de austeridade e dificuldades" (EEA, 2013b).

O principal objetivo desta investigação passava pela criação de modelos de previsão de indicadores de qualidade do ar, para a cidade do Porto. Esta previsão tem como finalidade identificar períodos de fraca qualidade do ar, de modo a possibilitar o auxílio das entidades responsáveis a tomar as necessárias medidas de prevenção.

Outro dos objetivos desta dissertação correspondia ao estudo das variáveis que melhor explicam o comportamento de cada um dos poluentes atmosféricos. Sendo possível a previsão dos indicadores de qualidade do ar, isto é, das concentrações de determinado poluente, no meio em que este é verificado.

Os modelos propostos resultam do cruzamento das variáveis meteorológicas (direção e velocidade do vento, temperatura, radiação, índice de nuvens e pluviosidade), e do histórico de emissões registadas em duas estações de monitorização situadas na cidade do Porto para os poluentes CO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, e O<sub>3</sub>. Inerente ao processo de construção dos modelos, existe sempre um erro de previsão associado a causas e

fatores independentes dos *inputs* dos modelos, e que podem ocorrer com mais ou menos frequência em diferentes horas do dia, da semana e mesmo do mês.

Uma vez que esta investigação estuda o comportamento de poluentes com naturezas químicas diferentes, consequentemente, obteve resultados diferentes no que diz respeito às variáveis com mais influência sobre o comportamento dos poluentes. Relativamente aos poluentes em estudo, concluiu-se que:

- CO: Os resultados sugerem que a variável com menos influência no comportamento do CO é a variável dia da semana (Modelo 3, do poluente T1). Sendo que os erros MAPE resultantes são ligeiramente altos.

- NO: Os resultados indicam que as variáveis com menor influência são o dia da semana, a pluviosidade e a radiação nas duas estações de monitorização, sendo que na estação de Sobreiras-Lordelo do Ouro a variável direção do vento também foi identificada.

- NO<sub>2</sub>: Os resultados constataam que as variáveis com menor influência são o dia da semana, o índice de nuvens e a pluviosidade.

- NO<sub>x</sub>: Os resultados sugerem que as variáveis dia da semana, radiação, temperatura e índice de nuvens, não conseguem prever o comportamento do poluente com tanta eficácia como as restantes variáveis.

- PM<sub>10</sub>: Os resultados indicam que as variáveis com menor influência no comportamento correspondem ao dia da semana, à direção do vento e à pluviosidade. Tendo sido verificados erros MAPE elevados.

- PM<sub>2,5</sub>: Os resultados sugerem que as variáveis com menor influência são o dia da semana e a direção do vento, contudo foram verificados valores muito elevados dos erros MAPE, que não permitem atribuir confiança a estes resultados.

- O<sub>3</sub>: Os resultados indicam que as variáveis com menor influência sobre o poluente são a variável hora, dia da semana, índice de nuvens e pluviosidade. Sendo que as variáveis direção e velocidade do vento, radiação e temperatura preveem melhor o comportamento do ozono.

## 7.1 Trabalhos Futuros

Esta investigação apresenta um estudo inovador de desenvolvimento de modelos de previsão de qualidade do ar, em que nesta fase, surge um conjunto de ideias que merecem alguma ponderação. Os desenvolvimentos futuros sugeridos pela autora, para continuação deste estudo são:

- Integração de outro tipo de variáveis, que não estavam disponíveis durante a realização desta investigação, tais como variáveis de topografia e ordenamento do território.
- Aumentar o conjunto de dados históricos de emissões, alargando o intervalo de tempo em estudo.
- Inclusão de mais estações de Rede de Monitorização de Qualidade do Ar.

# Capítulo 8

## Bibliografia

- AEA. (2013). O ar que respiramos, Melhorar a qualidade do ar na Europa. (pp. 39): Agência Europeia do Ambiente.
- APA. (2008). Evolução da qualidade do ar em Portugal entre 2001 e 2005. (pp. 100). Amadora: Agência Portuguesa do Ambiente
- APA. (2013). Base de Dados Online sobre Qualidade do Ar (QualAr) Obtido em 25-11-2013, de Agência Portuguesa do Ambiente <http://www.qualar.org/>
- Arbage, M., Degrazia, G., e Moraes, O. (2006). Simulação euleriana da dispersão local da pluma de poluente atmosférico de candiota. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21(2), 153-160.
- Borrego, C., Monteiro, A., Pay, M. T., Ribeiro, I., Miranda, A. I., Basart, S., e Baldasano, J. M. (2011). How bias-correction can improve air quality forecasts over Portugal. *Atmospheric Environment*, 45, 6629-6641.
- CCDRN. (2012). Relatório de Análise Estatística dos Dados de Qualidade do Ar, da Região Norte, em 2011 (pp. 105): Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte.
- CCDRN. (2013). Planos de Qualidade do Ar. Obtido em 25-11-2013, de Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte <http://www.ccdrn.pt/pt/ambiente/qual-ar-emissoes-atmosfericas/>
- CE. (2014, 03/06/2014). National Emission Ceilings. Obtido em 30/06/2014, de Comissão Europeia <http://ec.europa.eu/environment/air/pollutants/ceilings.htm>
- Cobourn, W. G. (2010). An enhanced PM2.5 air quality forecast model based on nonlinear regression and back-trajectory concentrations. *Atmospheric Environment*, 44(25), 3015–3023. doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.05.009
- Correia, A. (2012). *Avaliação de desempenho de modelos de qualidade do ar*. (Mestre em Engenharia do Ambiente), Universidade de Aveiro
- Costa, A. (2003). *Avaliação da Qualidade do Ar ao Nível Local: Contributo para o desenvolvimento urbano sustentável*. (Mestre em Poluição Atmosférica), Universidade de Aveiro.
- EEA. (1998). Assessment and Management of Urban Air Quality in Europe *EEA Monograph* (Vol. 5): European Environment Agency.

- EEA. (2013a). Air Pollution Fact Sheet 2013: Portugal. In E. E. A. EEA (Ed.), (pp. 22). Copenhagen : Publications Office of the European Union: European Environment Agency.
- EEA. (2013b). Air pollution still harming health across Europe. Obtido em 18-10-2014,de European Environment Agency <http://www.eea.europa.eu/media/newsreleases/air-pollution-still-causing-harm>
- EEA. (2013c). Air Quality in Europe - 2013 report (Vol. 9, pp. 112). Copenhagen : Publications Office of the European Union: European Environment Agency.
- EEA. (2013d). Environmental Terminology and Discovery Service (ETDS). Obtido em 04-11-2013, 2013,de European Environment Agency
- EEA. (2013e). Poluição atmosférica. Obtido em 25-10-2013,de European Environment Agency <http://www.eea.europa.eu/pt/themes/air/intro>
- EEA. (2014). NEC Directive status report 2013 (pp. 50). Luxembourg: Publications Office of the European Union: European Environment Agency.
- Europeia, U. (2014). Gestão e qualidade do ar ambiente. *Sínteses da legislação da UE*. Obtido em 04/02/2014 [http://europa.eu/legislation\\_summaries/other/128031a\\_pt.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/other/128031a_pt.htm)
- FCT/UNL, I. (2007). PTEN 2006: Programa para os Tectos de Emissão Nacionais (pp. 202). Amadora: Instituto do Ambiente & Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente FCT/UNL.
- GEMAC. (2014). Índice de Qualidade do Ar. Obtido em 01-04-2014,de Universidade de Aveiro [http://adamastor.dao.ua.pt/nova\\_previsao/iqa\\_info.html](http://adamastor.dao.ua.pt/nova_previsao/iqa_info.html)
- Ghazali, S. I., L. H. (2012). *Air quality prediction using artificial neural network*. Paper presented at the The International Conference on Civil and Environmental Engineering Sustainability, Malaysia.
- IAP. (2013). Fontes de poluição atmosférica. Obtido em 04-11-2013,de Instituto Ambiental do Paraná <http://www.iap.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=130>
- IARC. (2013). IARC: Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths [Press release]. Retrieved from [http://www.iarc.fr/en/media-centre/iarcnews/pdf/pr221\\_E.pdf](http://www.iarc.fr/en/media-centre/iarcnews/pdf/pr221_E.pdf)
- IM, e AEmet. (2011). Atlas Climatérico Ibérico: Instituto de Meteorologia; Agência Estatal de Meteorologia de Espanha
- INE. (2014). Censos 2011, Resultados Definitivos. Obtido em 15-09-2014,de Instituto Nacional de Estatística [http://www.ine.pt/scripts/flex\\_definitivos/Main.html](http://www.ine.pt/scripts/flex_definitivos/Main.html)
- INERIS, Laplace, I. P.-S., e LISA. (2013). Documentation of the chemistry-transport model CHIMERE: INERIS, Institut Pierre-Simon Laplace, LISA.
- IPMA. (2013). Enciclopedia ipma.pt. Obtido em 25-11-2013,de Instituto Português do Mar e da Atmosfera <http://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/>
- Kang, D., Mathur, R., e Rao, T. (2010). Assessment of bias-adjusted PM<sub>2.5</sub> air quality forecasts over the continental United States during 2007. *Geoscientific Model Development*, 3, 309–320.

- Lopes, F. (2010). *Previsão a curto e médio prazo de preços em mercado de carbono*. (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Maldaner, S., e Gonçalves, J. B. (2012). *Comparação entre diferentes escalas de tempo lagrangianas: uma aplicação na dispersão de contaminantes*. Paper presented at the CongreMet XI - Congreso Argentino de Meteorologia, Mendoza. <http://www.congremet.prmarg.org/upload/maldanersilvana.pdf>
- Mensink, C., Ridder, K., Deutsch, F., Van de Vel, K. (2008). Examples of scale interactions in local, urban, and regional air quality modelling. *Atmospheric Environment*, 89, 351-357.
- Miranda, M. (2014). *Avaliação da qualidade do ar em Cascais através de monitorização portátil*. (Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Monteiro, A. (2009). *Procedimento de Garantia e Controlo de Qualidade para a Previsão da Qualidade do Ar*. (Mestre em Engenharia do Ambiente), Universidade de Aveiro.
- Monteiro, A., Miranda, A. I., Borrego, C., e Vautard, R. (2007). Air quality assessment for Portugal. *Elsevier*, 373, 22-31.
- Monteiro, A., Vautard, R., Borrego, C., e Miranda, A. I. (2005). Long-term simulations of photo oxidant pollution over Portugal using CHIMERE model. *Elsevier*, 39, 3089-3101.
- Monteiro, M. (2007). *Desenvolvimento de um sistema de avaliação e previsão da qualidade do ar para Portugal*. (Doutoramento em Ciências Aplicadas ao Ambiente), Universidade de Aveiro.
- Ribeiro, I. L. (2008). *Análise da Previsão de Qualidade do Ar em Portugal Continental durante 2007 -2008*. (Mestre em Engenharia do Ambiente), Universidade de Aveiro.
- Ribeiro, J. (2014). *Previsão de preços de eletricidade para o mercado MIBEL*. (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Rodrigues, A. (2013). *Avaliação da Qualidade do Ar a longo prazo da cidade de Lisboa*. (Mestre em Engenharia do Ambiente), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Russo, A., Raischel, F., e Lind, P. (2013). Air quality prediction using optimal neural networks with stochastic variables. *Atmospheric Environment*, 79, 822-830.
- Smartwatt. (2014). Smartwatt, Solutions for Energy Systems. Obtido em 01-09-2014 <http://www.smartwatt.pt/>
- Sousa, P. (2008). *Simulação da qualidade do ar para Portugal com o modelo TAPM*. (Mestre em Engenharia do Ambiente), Universidade de Aveiro.
- Sousa, S. (2007). *Plano de Melhoria da Qualidade do Ar da Região Norte*. (Mestre em Engenharia do Ambiente), Universidade de Aveiro.
- USEPA. (1999). Guideline for developing an ozone forecasting program (pp. 88). Estados Unidos: United States Environmental Protection Agency.
- Vautard, R., Moran, M. D., Solazzo, E., Gilliam, R. C., Matthias, V., Bianconi, R., Chemel, C., Ferreira, J., Geyer, B., Hansen, A. B., Jericevic, A., Prank, M., Segers, A., Silver, J. D.,

- Werhahn, J., Wolke, R., Rao, S. T., e Galmarini, S. (2012). Evaluation of the meteorological forcing used for the Air Quality Model Evaluation International Initiative (AQMEII) air quality simulations. *Atmospheric Environment*, 53, 15-37.
- Vlachokostas, C., Achillas, C., Chourdakis, E., e Moussiopoulous, N. (2011). Combining regression analysis and air quality modelling to predict benzene concentration levels. *Atmospheric Environment*, 45, 2585-2592.
- WHO. (2003). Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide. In W. R. O. f. Europe (Ed.), *Report on a WHO Working Group* (pp. 98). Bonn, Germany: World Health Organization.
- Zhang, Y., Bocquet, M., Mallet, V., Seigneur, C., e Backlanov, A. (2012). Real-time air quality forecasting, part I: History, techniques, and current status. *Atmospheric Environment*, 60, 632-655.

# Capítulo 9

## Anexos

**Anexo I** – Limites legais impostos pela Diretiva 2008/50/CE

**Anexo II** – Resultados da Previsão do CO

**Anexo III** – Resultados da Previsão do NO

**Anexo IV** – Resultados da Previsão do NO<sub>2</sub>

**Anexo V** – Resultados da Previsão do NO<sub>x</sub>

**Anexo VI** – Resultados da Previsão das PM<sub>10</sub>

**Anexo VII** – Resultados da Previsão das PM<sub>2,5</sub>

**Anexo VIII** – Resultados da Previsão do O<sub>3</sub>



## Anexo I - Limites legais impostos pela Diretiva 2008/50/CE

Tabela 1 - Limiares de avaliação superiores e inferiores para dióxido de azoto e óxidos de azoto.

<b>Dióxido de azoto e óxidos de azoto</b>	Valor limite horário para a proteção da saúde humana (NO <sub>2</sub> )	Valor limite anual para a proteção da saúde humana (NO <sub>2</sub> )	Nível crítico anual para a proteção da vegetação e dos ecossistemas naturais (NO <sub>2</sub> )
Limiar superior de avaliação	70 % do valor limite (140 µg/m <sup>3</sup> , a não exceder mais de 18 vezes em cada ano civil).	80 % do valor limite (32 µg/m <sup>3</sup> )	80 % do nível crítico (24 µg/m <sup>3</sup> ).
Limiar inferior de avaliação	50 % do valor limite (100 µg/m <sup>3</sup> , a não exceder mais de 18 vezes em cada ano civil).	65 % do valor limite (26 µg/m <sup>3</sup> )	65 % do nível crítico (19,5 µg/m <sup>3</sup> ).

Tabela 2 - Limiares de avaliação superiores e inferiores para partículas em suspensão.

<b>Partículas em suspensão (PM<sub>10</sub>/PM<sub>2,5</sub>)</b>	Média por período de 24 horas (PM <sub>10</sub> )	Média anual (PM <sub>10</sub> )	Média anual (PM <sub>2,5</sub> ) (1)
Limiar superior de avaliação	70 % do valor limite (35 µg/m <sup>3</sup> , a não exceder mais de 35 vezes em cada ano civil).	70 % do valor limite (28 µg/m <sup>3</sup> )	70 % do valor limite (17 µg/m <sup>3</sup> )
Limiar inferior de avaliação	50 % do valor limite (25 µg/m <sup>3</sup> , a não exceder mais de 35 vezes em cada ano civil).	50 % do valor limite (20 µg/m <sup>3</sup> )	50 % do valor limite (12 µg/m <sup>3</sup> ).

(1) O limiar superior de avaliação e o limiar inferior de avaliação para as PM<sub>2,5</sub> não se aplicam às medições efetuadas para avaliar o cumprimento do objetivo de redução de exposição às PM<sub>2,5</sub> para proteção da saúde humana.

Tabela 3 - Limiares de avaliação superiores e inferiores para o monóxido de carbono.

<b>Monóxido de carbono</b>	Média por períodos de oito horas
Limiar superior de avaliação	70 % do valor limite (7 mg/m <sup>3</sup> ).
Limiar inferior de avaliação	50 % do valor limite (5 mg/m <sup>3</sup> ).

Tabela 4 - Valores limite para a proteção da saúde humana para os poluentes dióxido de azoto, monóxido de carbono e PM<sub>10</sub>.

Período de referência	Valor limite	Margem de tolerância	Data limite para a observância do valor limite

Dióxido de azoto			
Uma hora	200 µg/m <sup>3</sup> , a não exceder mais de 18 vezes por ano civil.	50 % em 19 de Julho de 1999, a reduzir em 1 de Janeiro de 2001 e em cada período de 12 meses subsequente numa percentagem anual idêntica, até atingir 0 % em 1 de Janeiro de 2010.	1 de Janeiro de 2010.
Ano civil	40 µg/m <sup>3</sup>	50 % em 19 de Julho de 1999, a reduzir em 1 de Janeiro de 2001 e em cada período de 12 meses subsequente numa percentagem anual idêntica, até atingir 0 % em 1 de Janeiro de 2010.	1 de Janeiro de 2010.
Monóxido de carbono			
Máximo diário das médias de oito horas (2).	10 mg/m <sup>3</sup>	60%	– <sup>(1)</sup>
PM10			
1 dia	50 µg/m <sup>3</sup> , a não exceder mais de 35 vezes por ano civil.	50%	– <sup>(1)</sup>
Ano civil	40 µg/m <sup>3</sup>	20%	– <sup>(1)</sup>

(1) Em vigor desde 1 de Janeiro de 2005.

(2) O valor máximo diário das médias de oito horas é selecionado com base nas médias obtidas por períodos de oito horas consecutivas, calculadas a partir dos dados horários e atualizadas de hora a hora. Cada média por período de oito horas calculada desta forma é atribuída ao dia em que termina; desta forma, o primeiro período de cálculo de um dia tem início às 17 horas do dia anterior e termina à 1 hora do dia em causa; o último período de cálculo de um dia tem início às 16 horas e termina às 24 horas do mesmo dia.

Tabela 5 - Limite de concentração de exposição a PM<sub>2,5</sub>.

Limite de concentração de exposição	Ano para a observância do limite de concentração de exposição
20 µg/m <sup>3</sup>	2015

Tabela 6 - Valor alvo do PM<sub>2,5</sub>.

Período de referência	Valor alvo	Data limite para a observância do valor alvo
Ano civil	25 µg/m <sup>3</sup>	1 janeiro de 2010

Tabela 7 – Valores limite do PM<sub>2,5</sub>.

Período de referência	Valor limite	Margem de tolerância	Data limite para a observância do valor limite
Fase 1			
Ano civil	25 µg/m <sup>3</sup>	20 % até 11 de Junho de 2008, a reduzir no dia 1 de Janeiro seguinte e em cada período de 12 meses subsequentes numa percentagem anual idêntica, até atingir 0 % em 1 de Janeiro de 2015.	1 de Janeiro de 2015.
Fase 2			
Ano civil	20 µg/m <sup>3</sup>	- <sup>(1)</sup>	1 de Janeiro de 2020.

(1) Fase 2 — valor limite indicativo a rever pela Comissão em 2013 à luz de novas informações sobre os efeitos na saúde e ambiente, a viabilidade técnica e a experiência obtida com o valor alvo.

## Anexo II – Resultados da Previsão do CO

As figuras que se seguem mostram a comparação entre as previsões obtidas com o modelo 3 (do poluente CO) e as concentrações reais para várias semanas do ano.

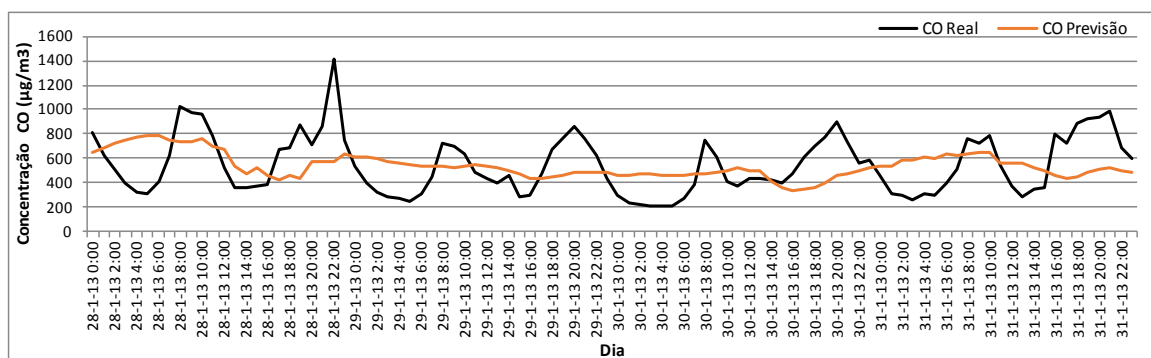


Figura 1 – Semana 5, de Janeiro de 2013.

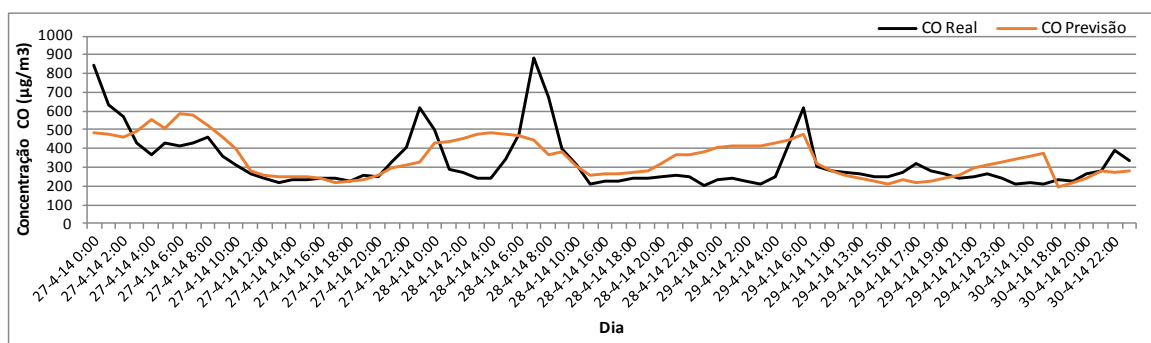


Figura 2 – Semana 18, de Abril de 2014.

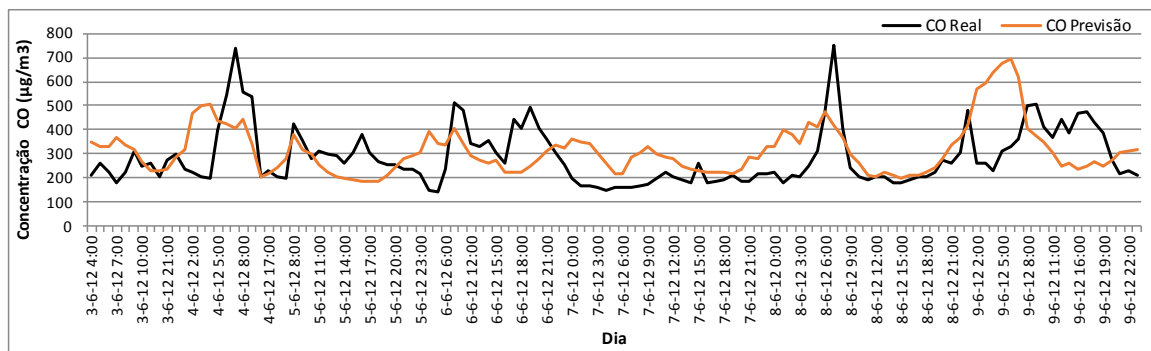


Figura 3 – Semana 23, de Junho de 2012

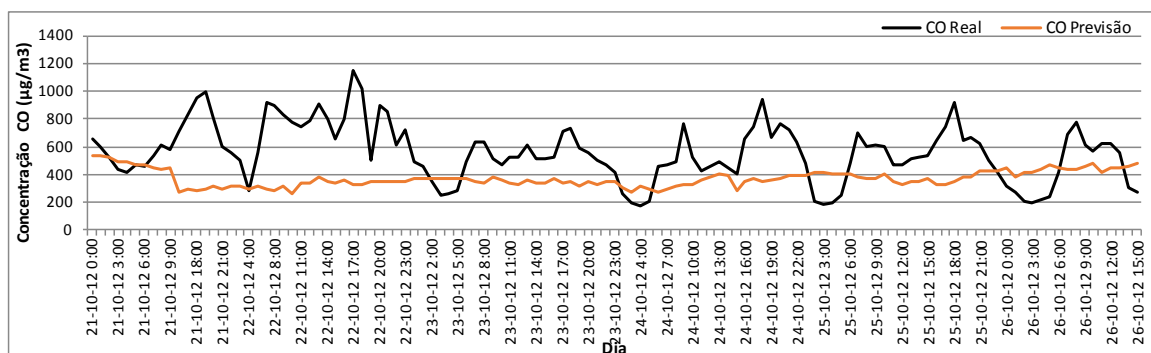


Figura 4 – Semana 43, de Outubro de 2012

### Anexo III – Resultados da Previsão do NO

As figuras que se seguem mostram a comparação entre as previsões obtidas com o modelo 12 em FSC e modelo15 para S-LO, e as concentrações reais para várias semanas do ano.

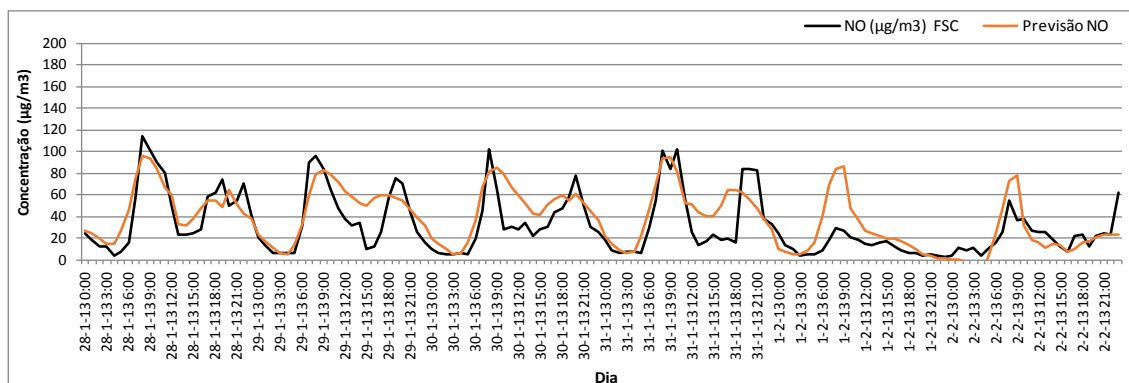


Figura 5 – Semana 5, de Janeiro de 2013 (em FSC).

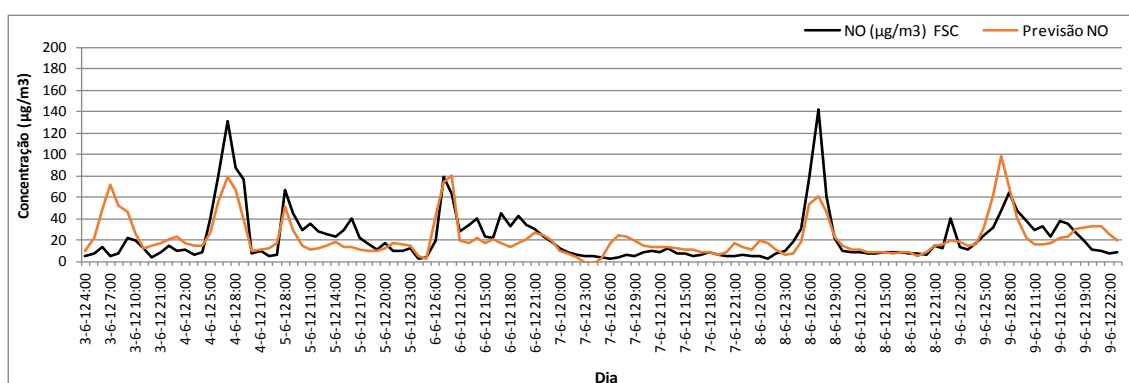


Figura 6 – Semana 23, de Junho de 2012 (em FSC).

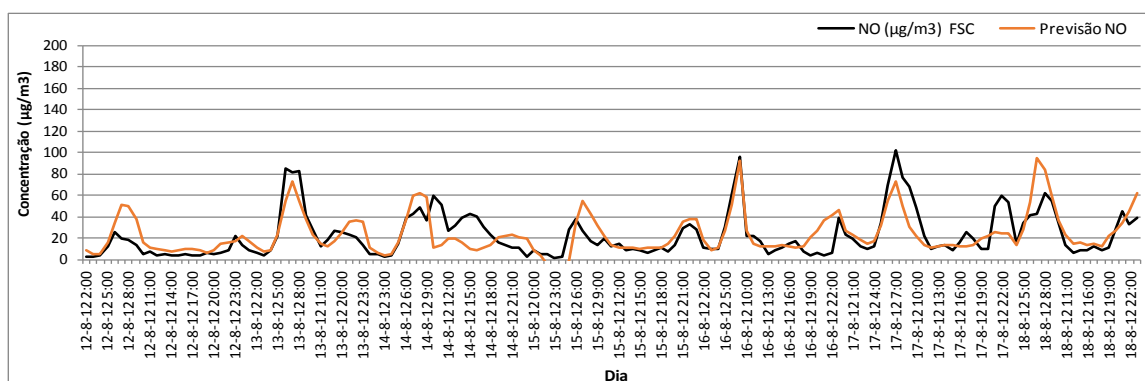
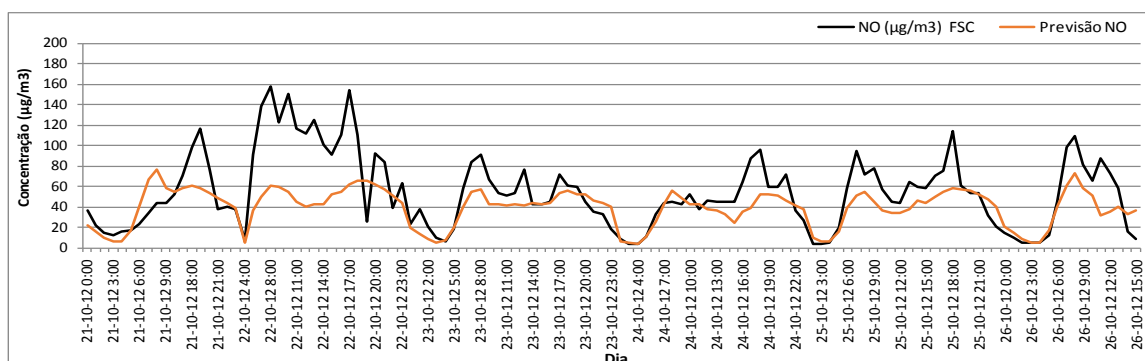


Figura 7 – Semana 33, de Agosto de 2012 (em FSC).



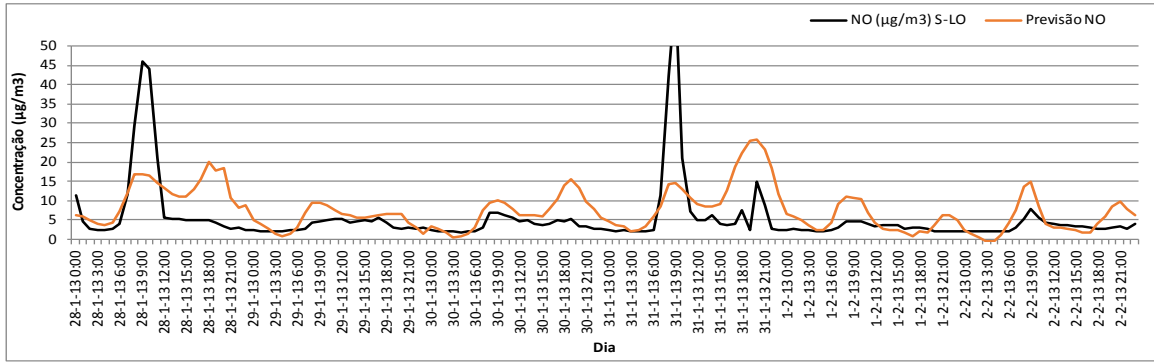


Figura 8 – Semana 43, de Outubro de 2012 (em FSC).

Figura 9 – Semana 5, de Janeiro de 2013 (em S-LO).

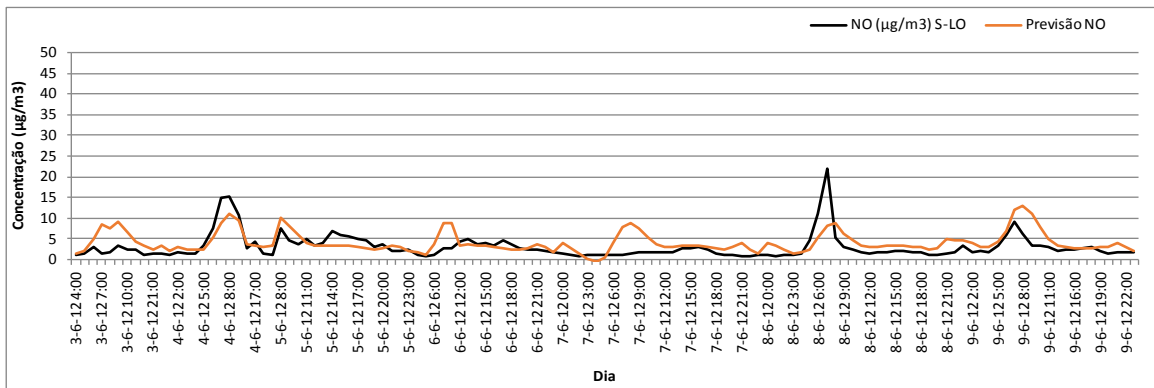


Figura 10 – Semana 23, de Junho de 2012 (em S-LO).

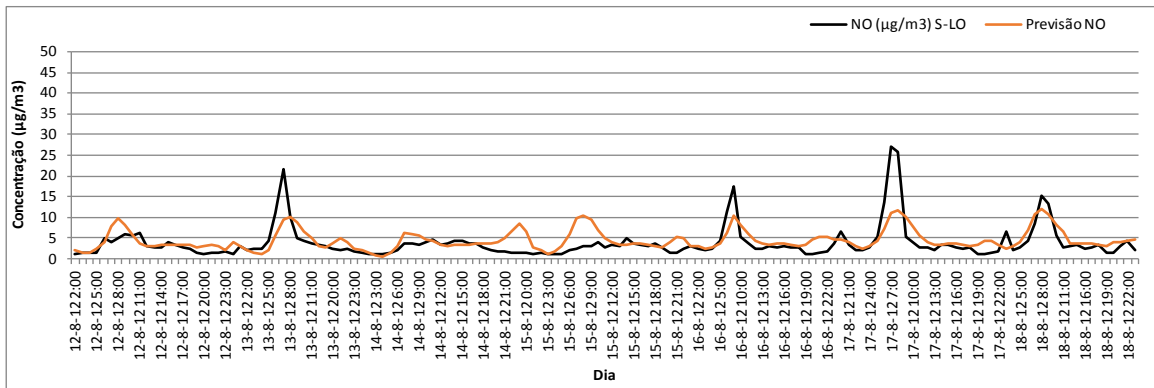


Figura 11 – Semana 33, de Agosto de 2012 (em S-LO).

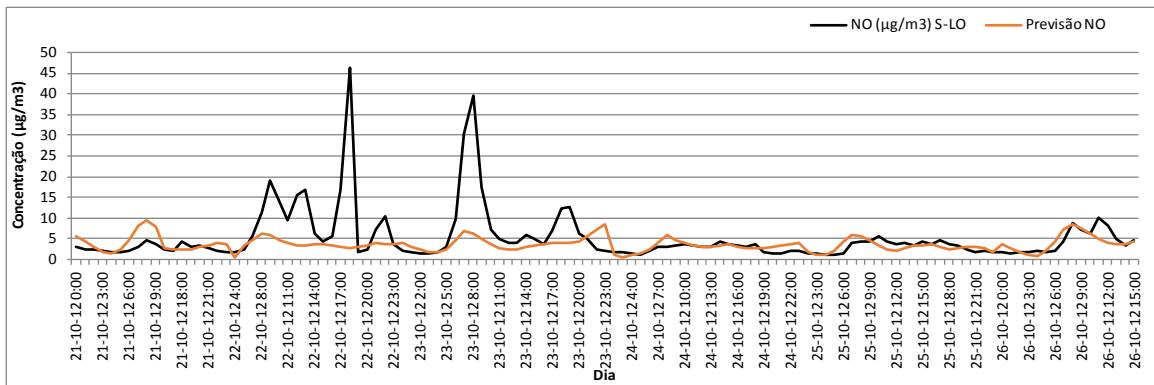


Figura 12 – Semana 43, de Outubro de 2012 (em S-LO).

## Anexo IV – Resultados da Previsão do NO<sub>2</sub>

As figuras que se seguem mostram a comparação entre as previsões obtidas com o modelo 8 em FSC e modelo 3 para S-LO, e as concentrações reais para várias semanas do ano.

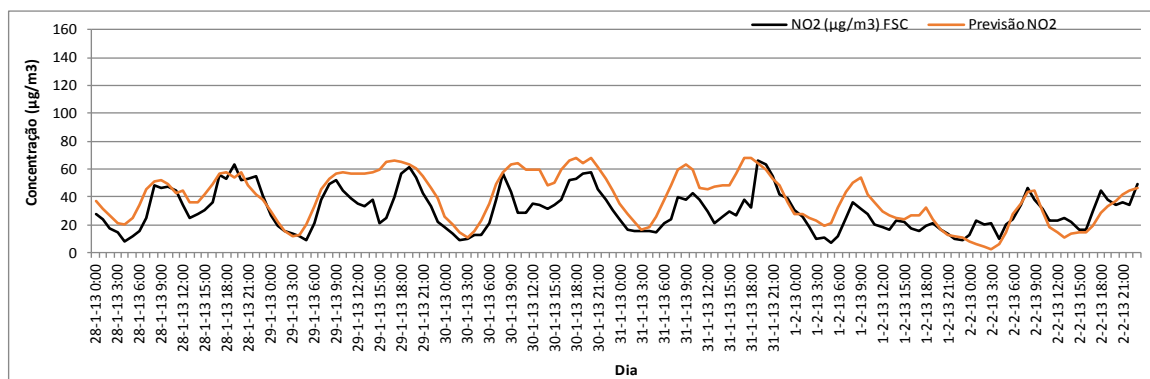


Figura 13 – Semana 5, de Janeiro de 2013 (em FSC).

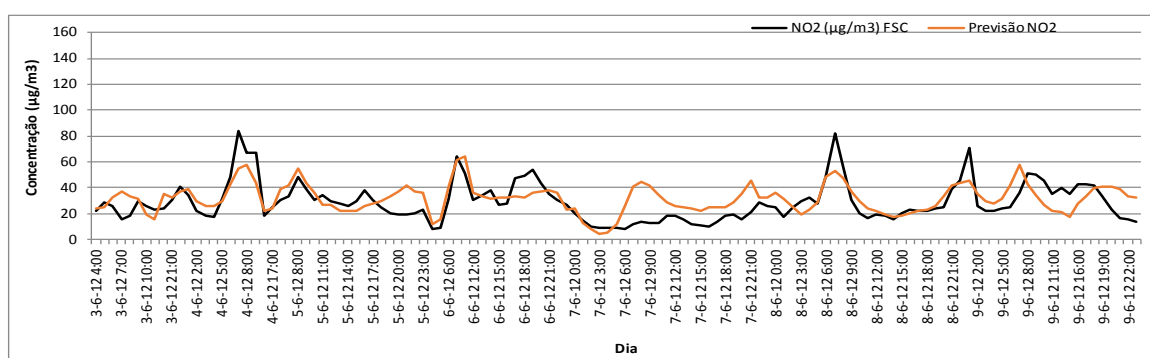


Figura 14 – Semana 23, de Junho de 2012 (em FSC).

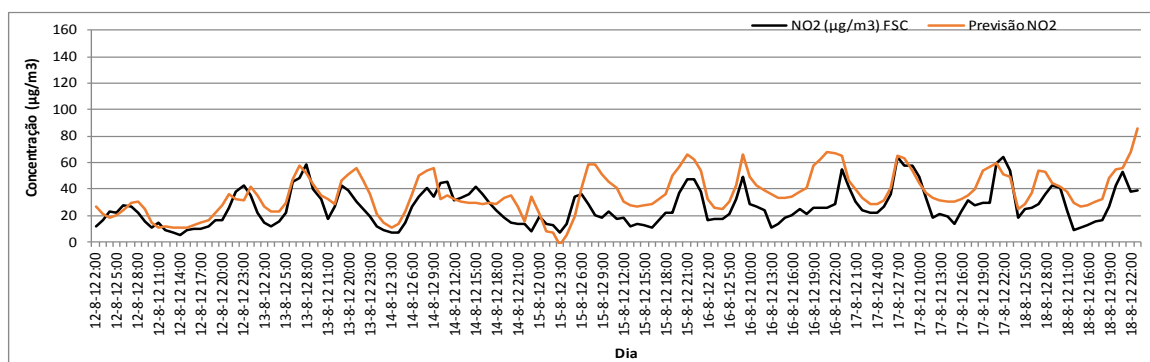


Figura 15 – Semana 33, de Agosto de 2012 (em FSC).

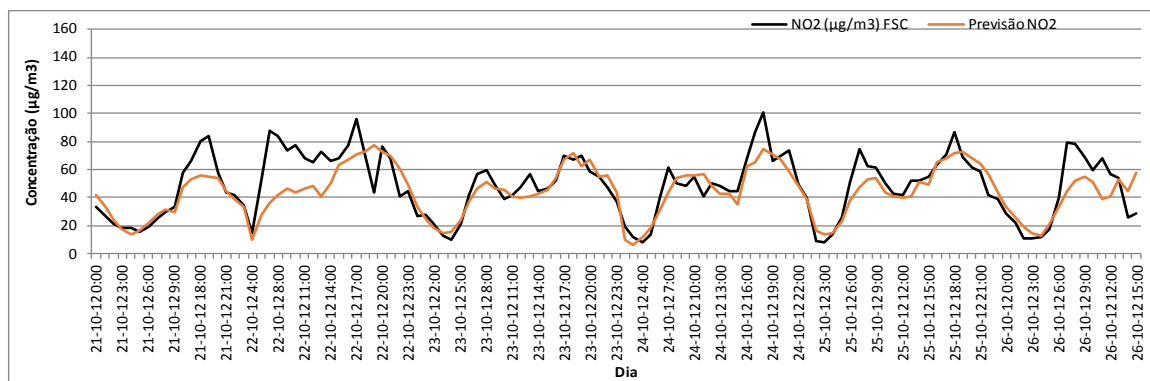


Figura 16 – Semana 43, de Outubro de 2012 (em FSC).

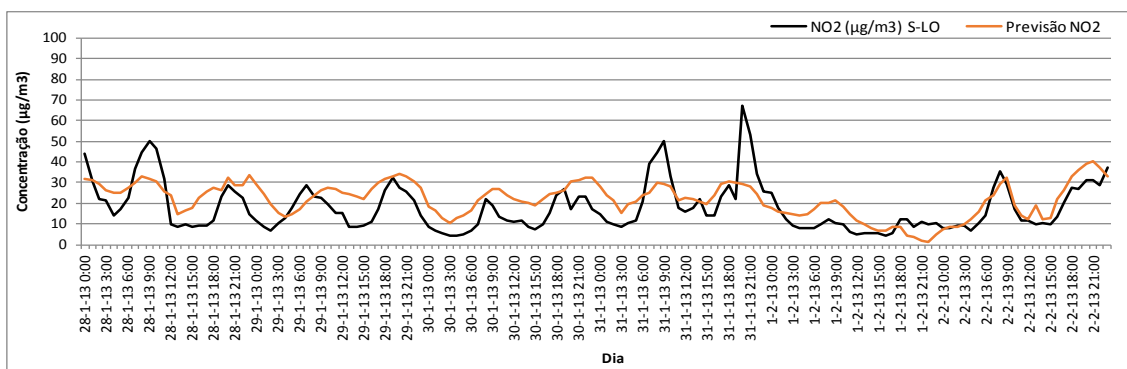


Figura 17 - Semana 5, de Janeiro de 2013 (em S-LO).

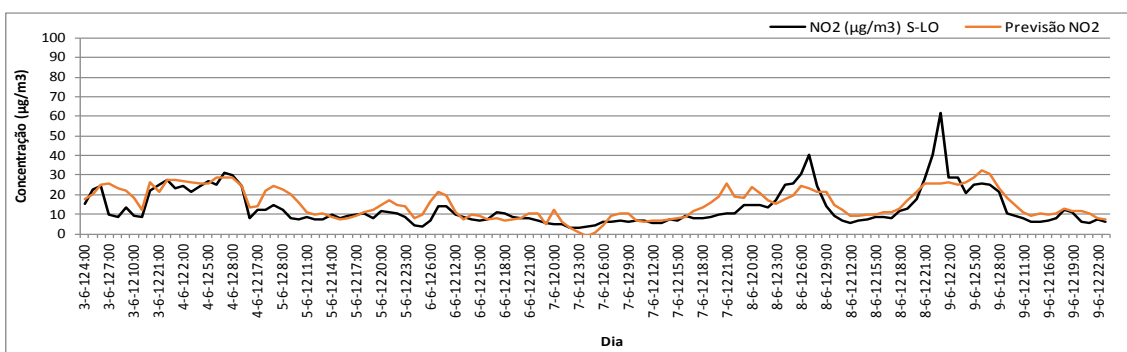


Figura 18 – Semana 23, de Junho de 2012 (em S-LO).

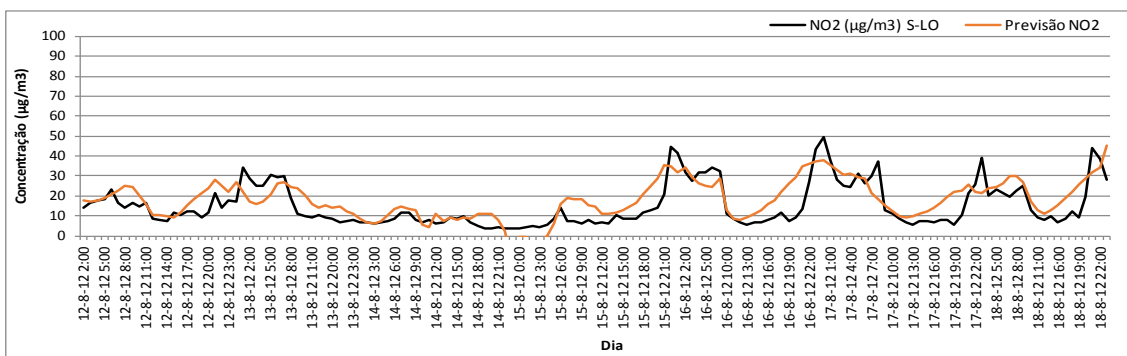


Figura 19 – Semana 33, de Agosto de 2012 (em S-LO).

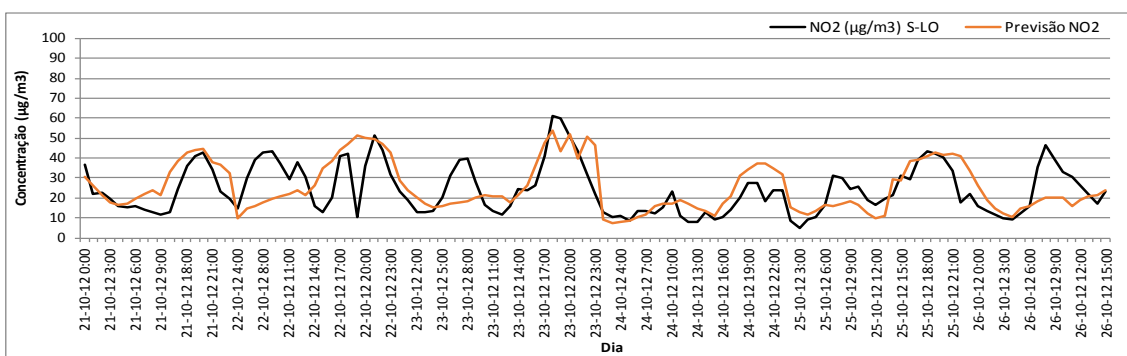


Figura 20 – Semana 43, de Outubro de 2012 (em S-LO).



## Anexo V – Resultados da Previsão do NO<sub>x</sub>

As figuras que se seguem mostram a comparação entre as previsões obtidas com o modelo 6 em FSC e modelo 12 para S-LO, e as concentrações reais para várias semanas do ano.

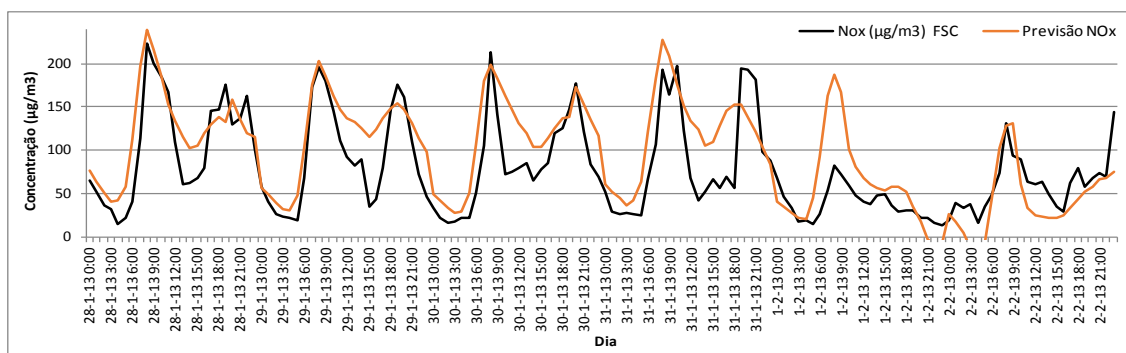


Figura 21 – Semana 5, de Janeiro de 2013 (em FSC).

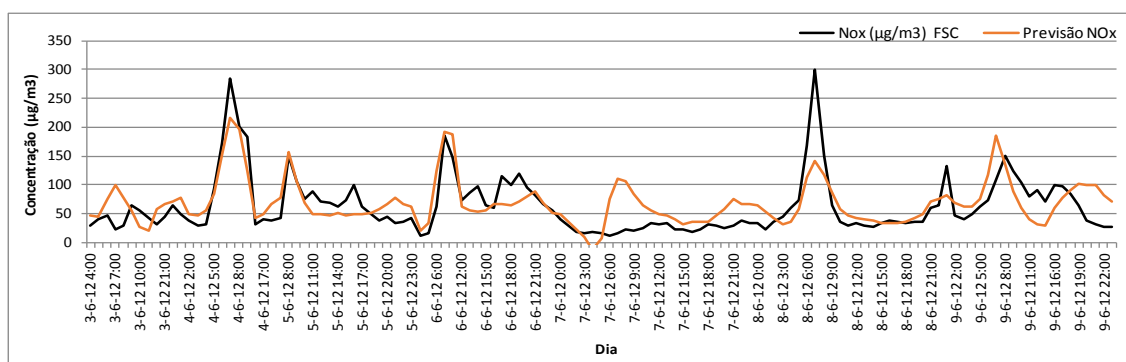


Figura 22 – Semana 23, de Junho de 2012 (em FSC).

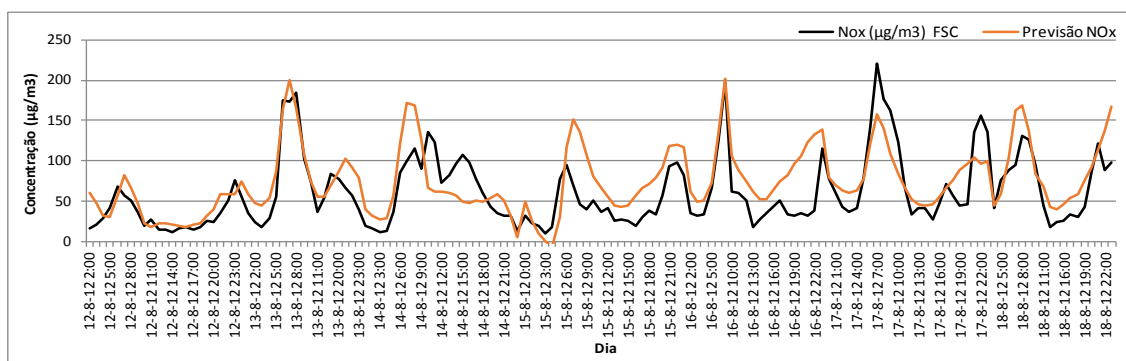


Figura 23 – Semana 33, de Agosto de 2012 (em FSC).

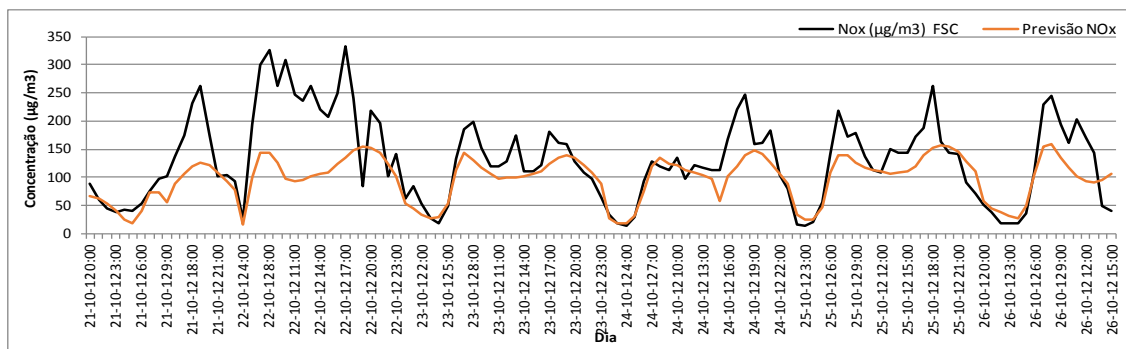


Figura 24 – Semana 43, de Outubro de 2012 (em FSC).

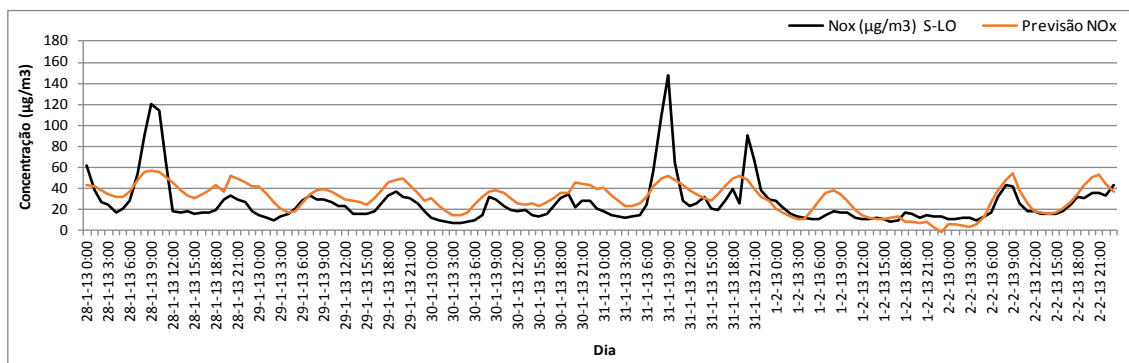


Figura 25 – Semana 5, de Janeiro de 2013 (em S-LO).

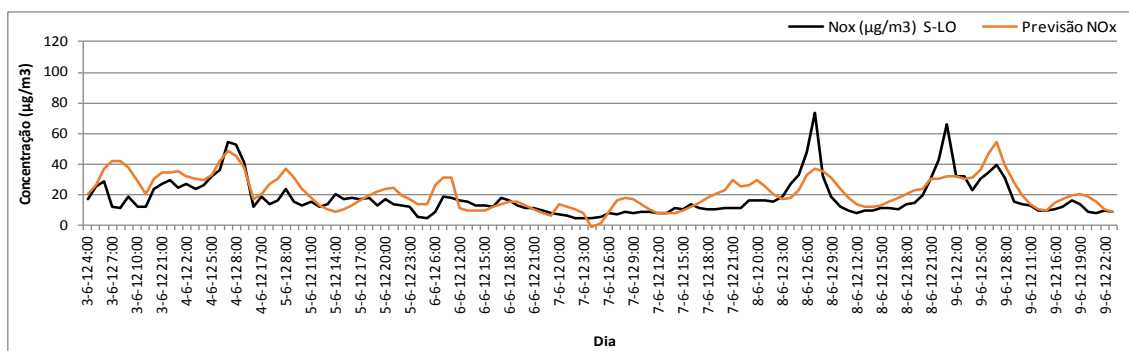


Figura 26 – Semana 23, de Junho de 2012 (em S-LO).

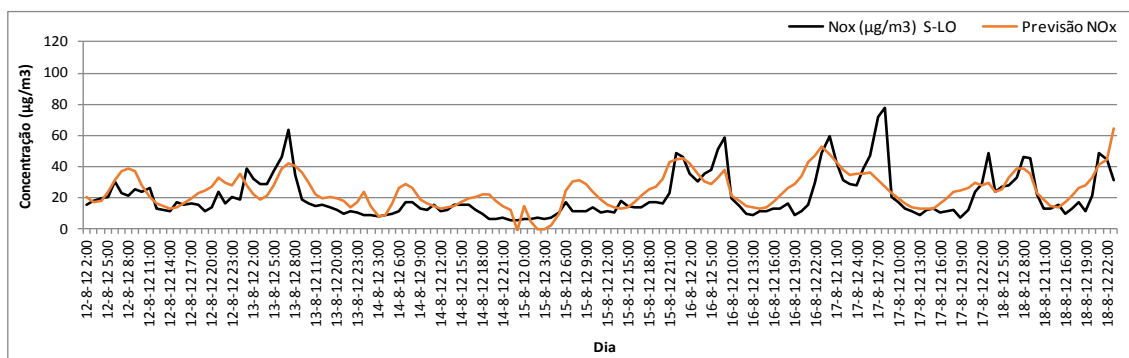


Figura 27 – Semana 33, de Agosto de 2012 (em S-LO).

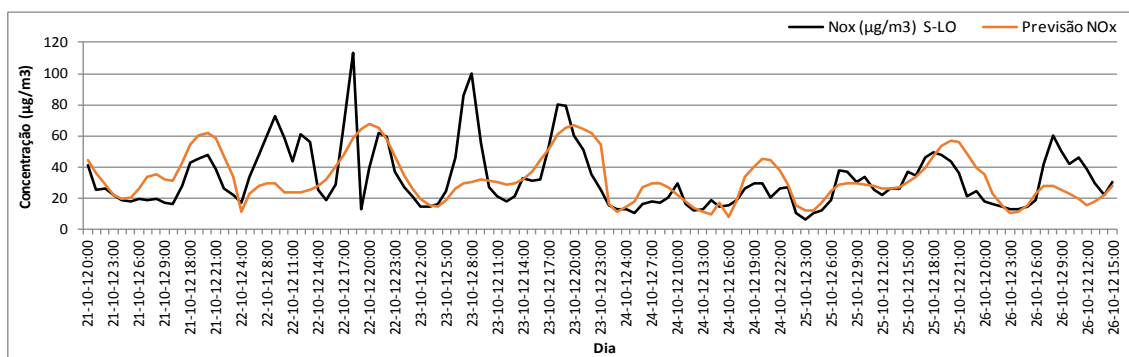


Figura 28 – Semana 43, de Outubro de 2012 (em S-LO).

## Anexo VI – Resultados da Previsão das PM<sub>10</sub>

As figuras que se seguem mostram a comparação entre as previsões obtidas com o modelo 14 em FSC e modelo 11 para S-LO, e as concentrações reais para várias semanas do ano.

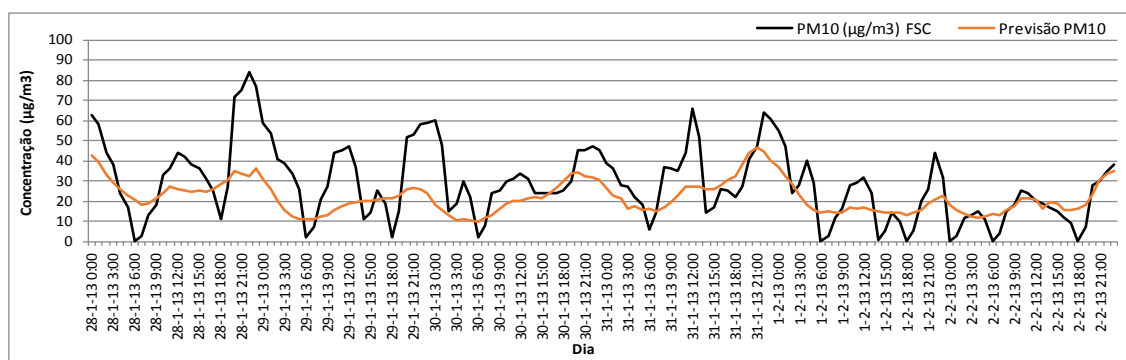


Figura 29 – Semana 5, de Janeiro de 2013 (em FSC).

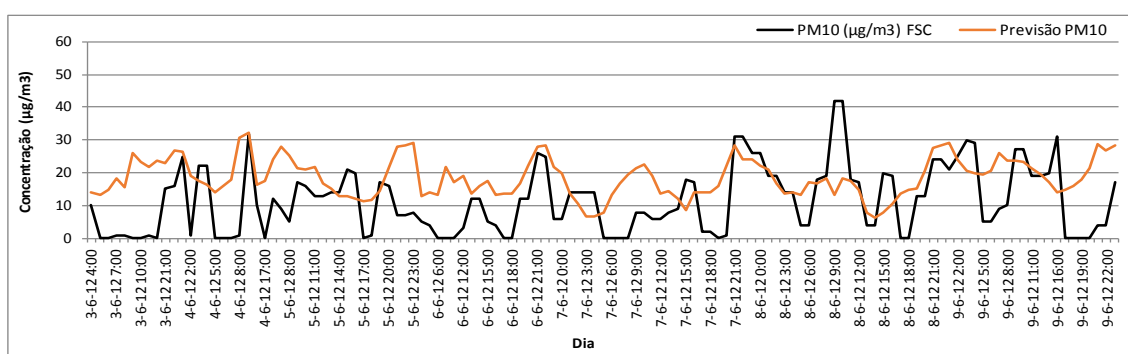


Figura 30 – Semana 23, de Junho de 2012 (em FSC).

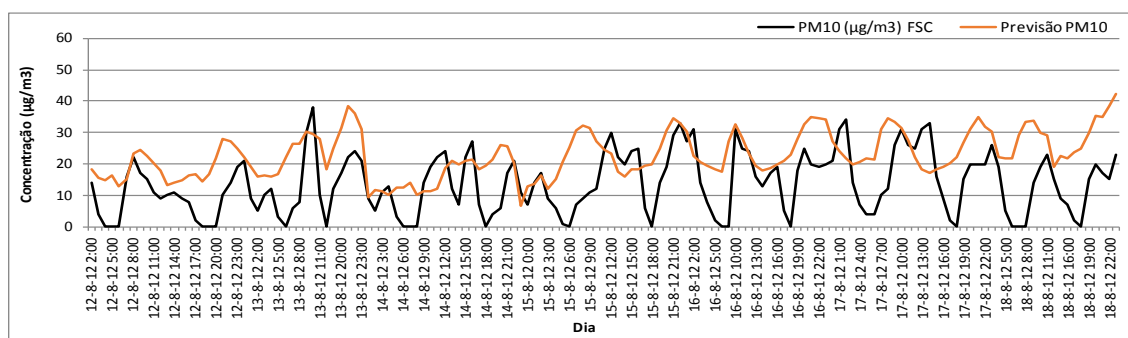


Figura 31 – Semana 33, de Agosto de 2012 (em FSC).

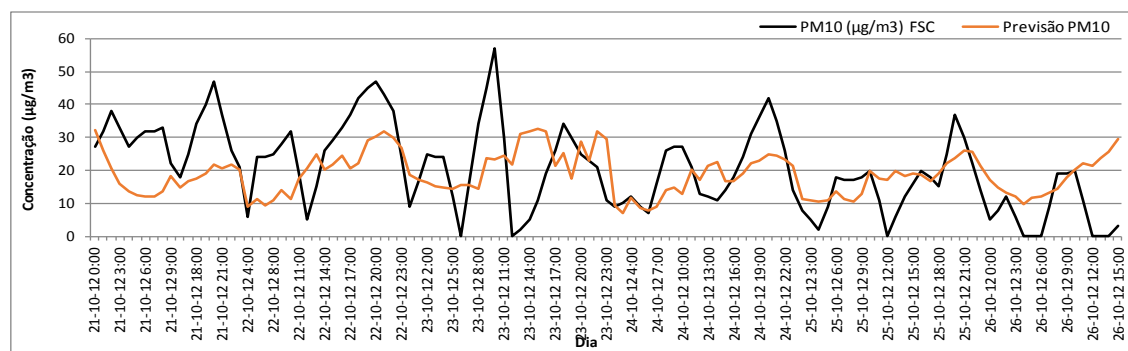


Figura 32 – Semana 43, de Outubro de 2012 (em FSC).

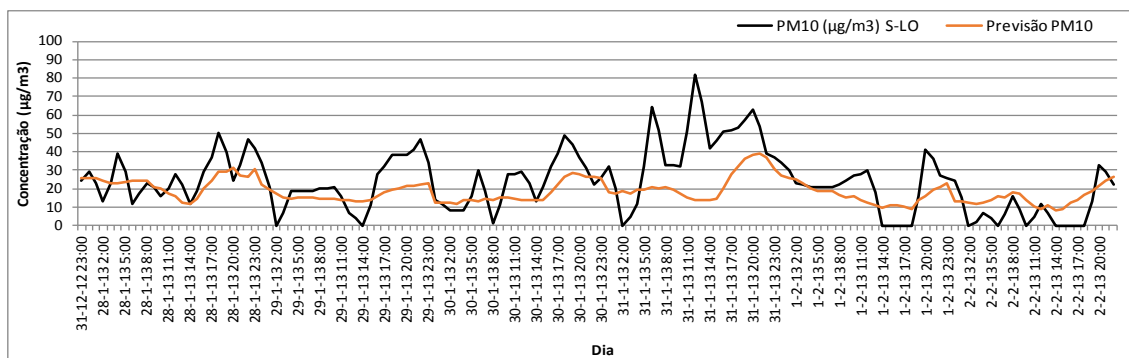


Figura 33 – Semana 5, de Janeiro de 2013 (em S-LO).

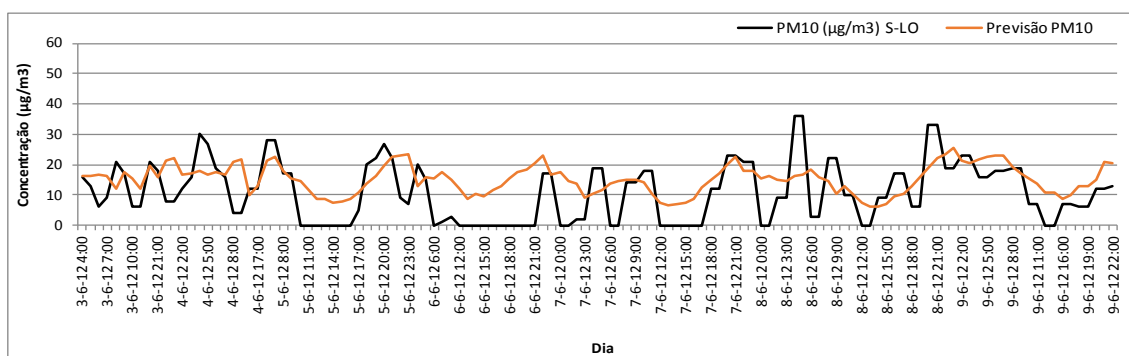


Figura 34 – Semana 23, de Junho de 2012 (em S-LO).

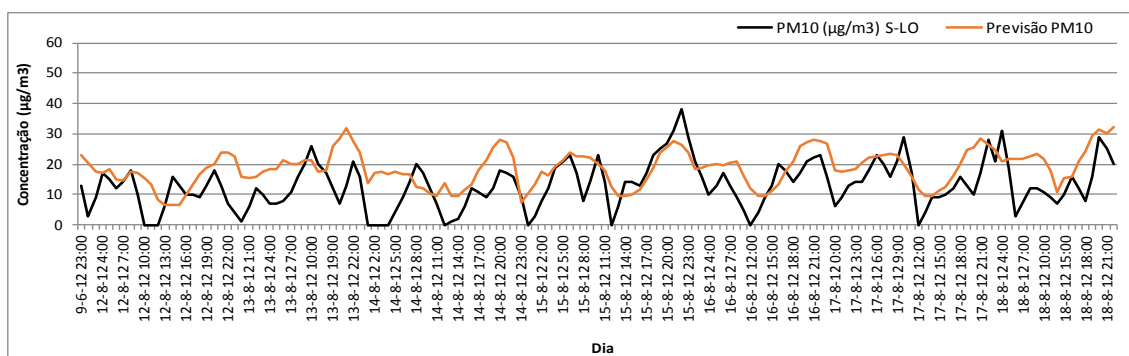


Figura 35 – Semana 33, de Agosto de 2012 (em S-LO).

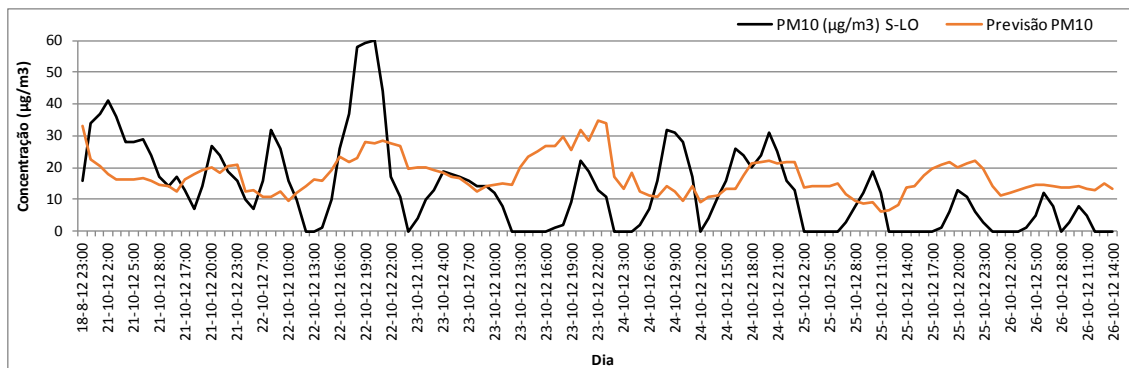


Figura 36 – Semana 43, de Outubro de 2012 (em S-LO).

## Anexo VII – Resultados da Previsão das PM<sub>2,5</sub>

As figuras que se seguem mostram a comparação entre as previsões obtidas com o modelo 14 em S-LO e as concentrações reais para várias semanas do ano.

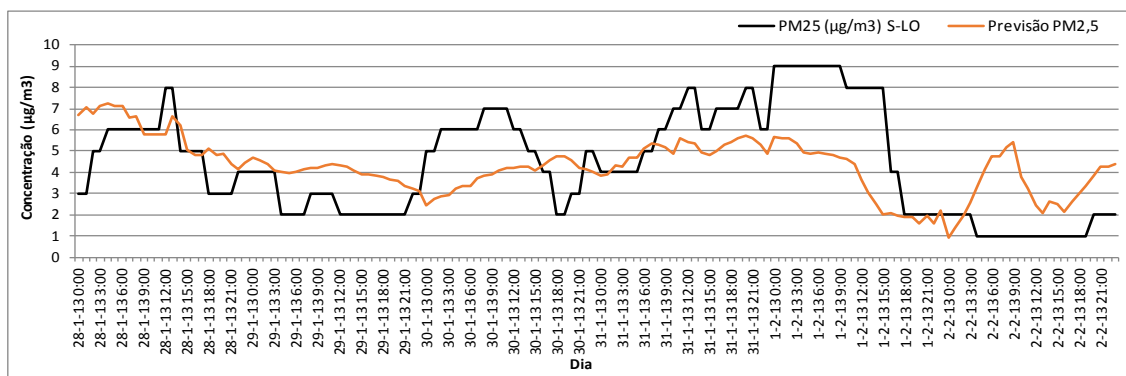


Figura 37 – Semana 5, de Janeiro de 2013 (em S-LO).

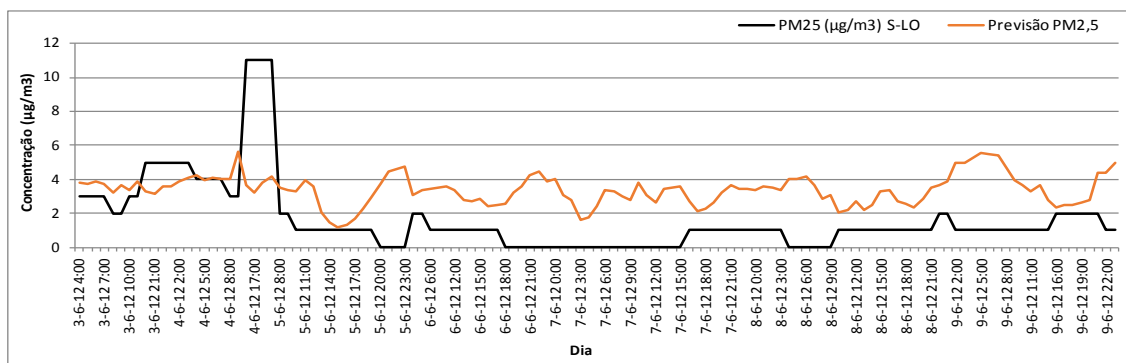


Figura 38 – Semana 23, de Junho de 2012 (em S-LO).

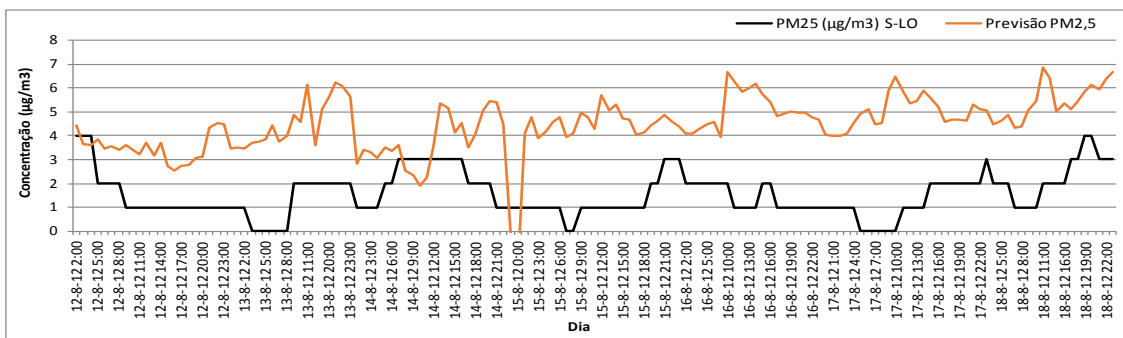


Figura 39 – Semana 33, de Agosto de 2012 (em S-LO).

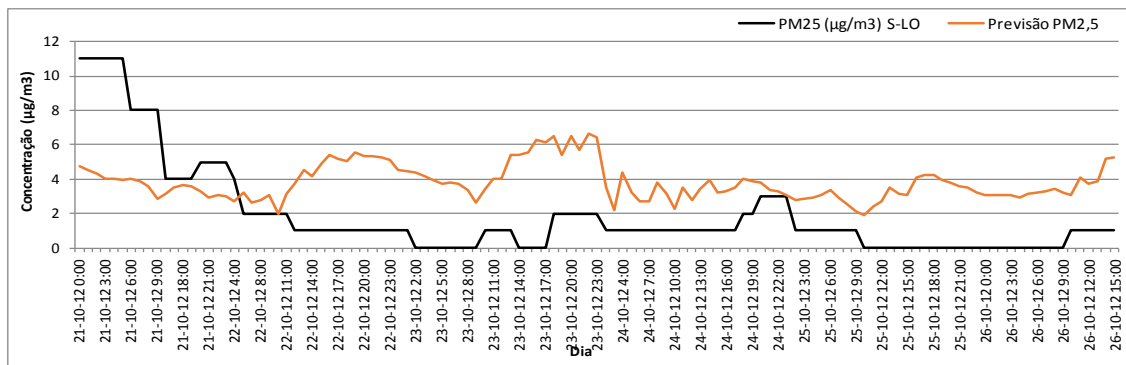


Figura 40 – Semana 43, de Outubro de 2012 (em S-LO).

## Anexo VIII – Resultados da Previsão do O<sub>3</sub>

As figuras que se seguem mostram a comparação entre as previsões obtidas com o modelo 3 em S-LO e as concentrações reais para várias semanas do ano.

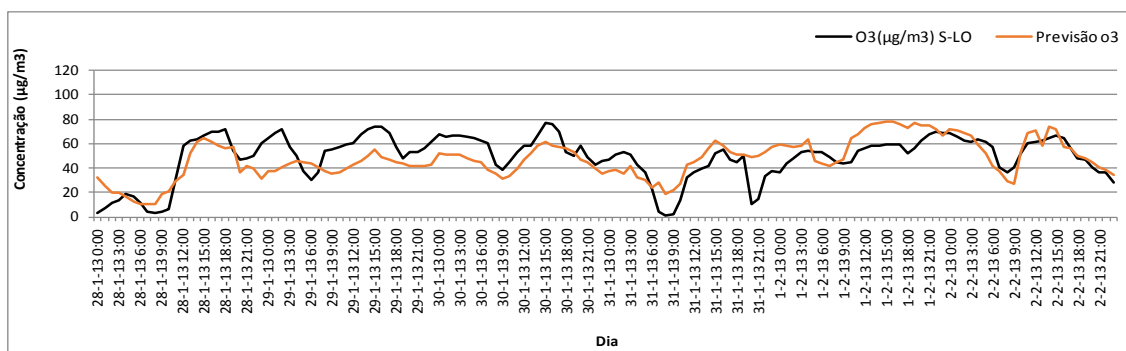


Figura 41 – Semana 5, de Janeiro de 2013 (em S-LO).

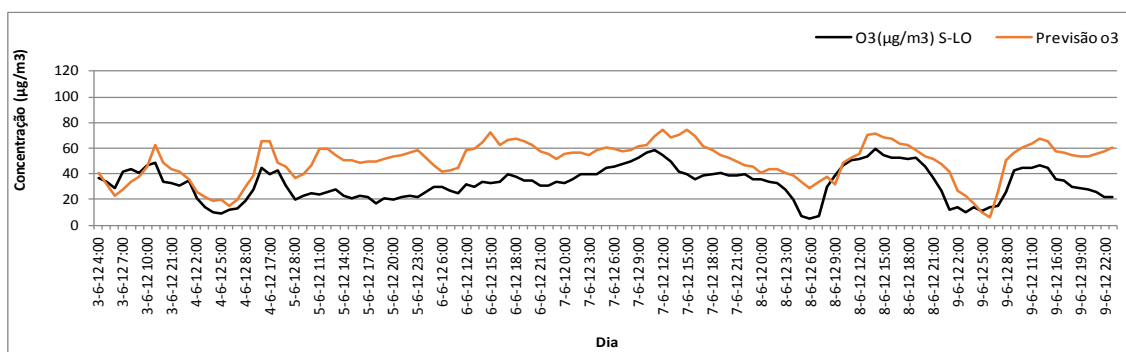


Figura 42 – Semana 23, de Junho de 2012 (em S-LO).

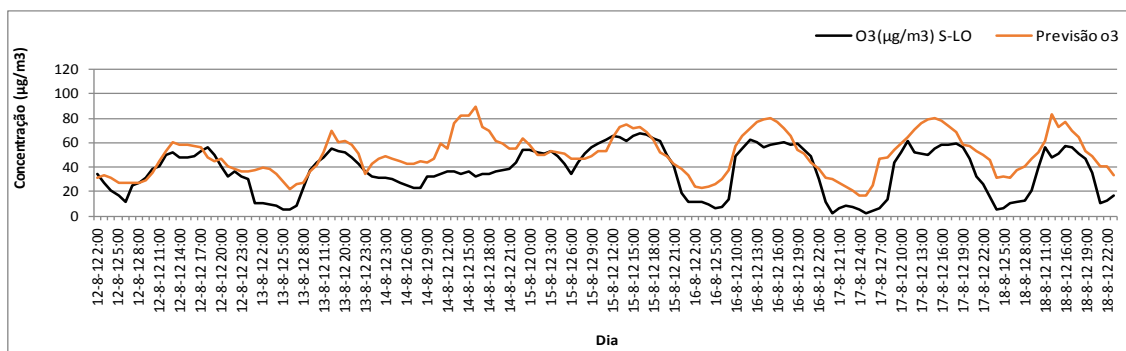


Figura 43 – Semana 33, de Agosto de 2012 (em S-LO).

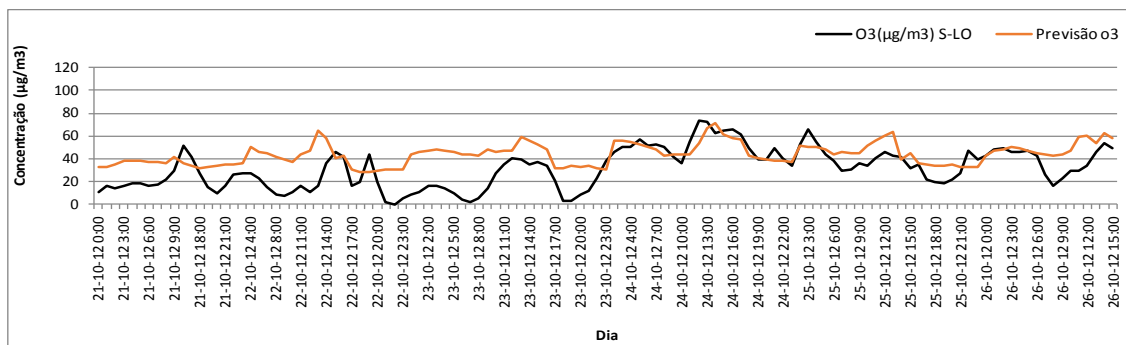


Figura 44 – Semana 43, de Outubro de 2012 (em S-LO).